INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

ORIGEN DE LA COPULACIÓN | MODELO COSMOLÓGICO | REDES NEURONALES

N.º 414

MARZO 2011

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COSMOLOGÍA

Limitaciones del modelo cosmológico estándar

CAMBIO CLIMÁTICO

Migraciones forzadas por inundaciones y sequías

NEUROCIENCIA

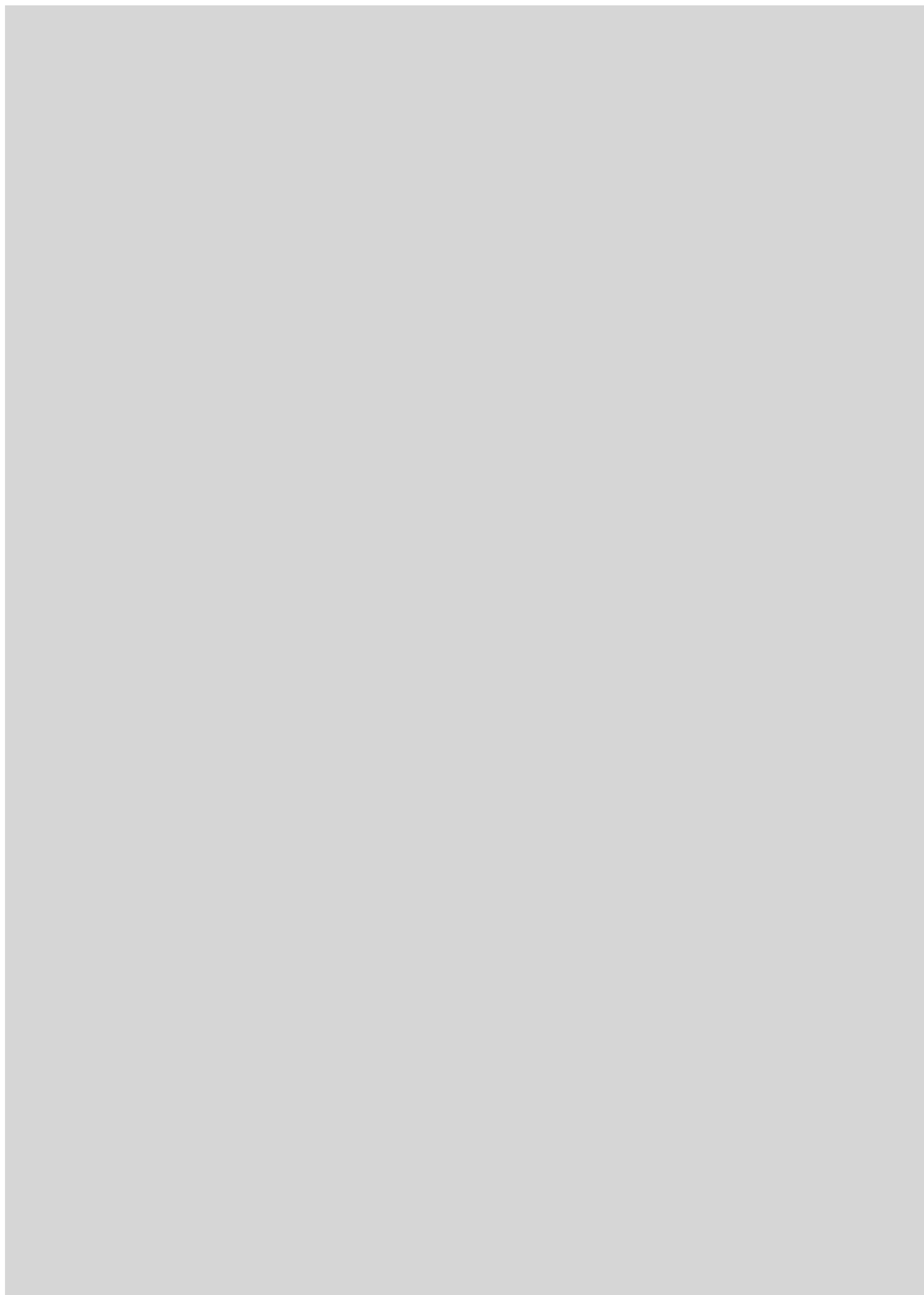
La complejidad de las redes neuronales

Cuando la fecundación interna cambió el curso de la evolución

La auténtica revolución sexual



6,00 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Marzo 2011, Número 414

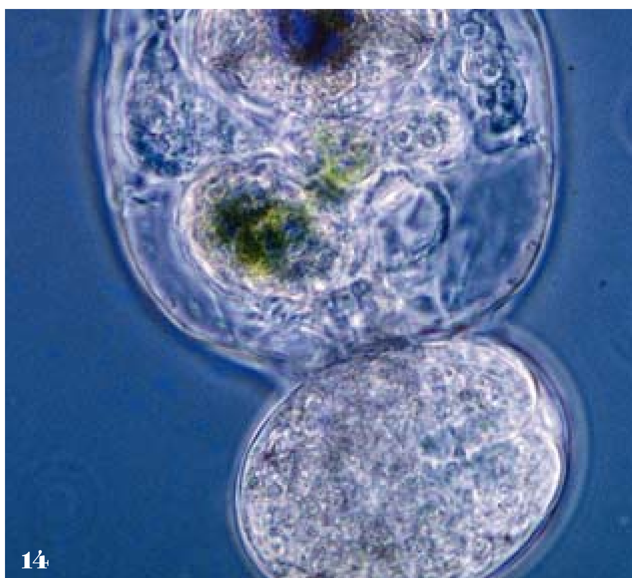
40

ARTÍCULOS

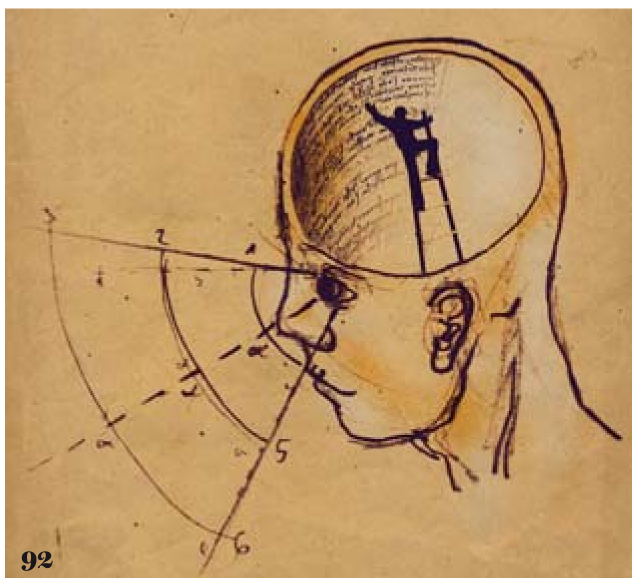
NASA/SPITZER/JPL-Caltech/STScI (Gran Nube de Magallanes)



7



14



92

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Ciertos fósiles de peces indican que la copulación en los vertebrados se originó 25 millones de años antes de lo que se pensaba y podría haber sido una fuerza impulsora en nuestra evolución. Habría establecido las bases para el desarrollo de las piernas, los órganos sexuales y tal vez las mandíbulas en el linaje de animales que dio lugar a los humanos. Ilustración de Owen Gildersleeve.



redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2010

ENERGÍA Y AGUA

En el artículo «Hojas artificiales», de Antonio Regalado [Investigación y Ciencia, diciembre de 2010], se trata principalmente la propuesta de Nathan S. Lewis, del Instituto de Tecnología de California, para aprovechar la energía solar. A pesar de que el combustible principal es el agua, no se hace mención alguna a los recursos hídricos necesarios. ¿Debe el agua estar depurada? ¿Sería aplicable la técnica en países sin grandes recursos hídricos? Si fuese imprescindible un proceso previo de desalinización, ¿sería el proyecto aún rentable?

Dov Rhodes
Haifa, Israel

Responde Lewis: *Si bien necesita estar depurada, en absoluto se requiere una gran cantidad de agua. Esta no se emplea como refrigerante, sino como precursor para almacenar la energía en forma de hidrógeno y oxígeno disociados. Basta muy poco hidrógeno para almacenar grandes cantidades de energía (se puede acumular más de 100 veces la energía que almacenaría una batería de litio del mismo peso). Además, el agua se reciclaría y podría obtenerse de la lluvia o, en muchos casos, incluso de vapor de agua.*

No es el agua lo que representa el principal problema. Lo más urgente en este momento es solucionar todos las dificultades técnicas para llevar la idea a la práctica.

OSCURA Y FRÍA

En «Mundos oscuros» [Investigación y Ciencia, enero de 2011], Jonathan Feng y Mark Trodden explican que las candidatas a partículas de materia oscura denominadas super-WIMP solo experimentarían los efectos de la interacción gravitatoria. Según esto, no podrían participar de las colisiones que normalmente permiten a las partículas ordinarias disipar energía: a saber, choques en los que la energía cinética se convierte en energía electromagnética, la cual es radiada en forma de fotones.

«Al producirse, la velocidad de las super-WIMP debió ser cercana a la de la luz», escriben los autores, a lo que añaden: «El tiempo que tardaron en frenarse y agruparse en halos habría retrasado la formación de galaxias». El único mecanismo mediante el que las super-WIMP podrían haber perdido energía cinética habría sido la conversión de una minúscula fracción de dicha energía en radiación gravitatoria. Si apenas interaccionan, ¿cómo pueden frenarse las super-WIMP?

Van Snyder
La Crescenta, California

Responden Feng y Trodden: *Si el universo no se expandiese, es cierto que las super-WIMP no podrían frenarse. Sin embargo, en un universo en expansión cualquier tipo de materia acaba por detenerse; ello quiere decir que, en última instancia, su movimiento se debe a la expansión cósmica (o, en términos técnicos, que se halla en reposo en el sistema de referencia comóvil, aquel que se expande junto con el universo). Es en este sentido en el que las super-WIMP acaban por detenerse y enfriarse. Por su parte, las interacciones débiles que experimentarían las WIMP (y a las que las super-WIMP serían insensibles) tampoco afectarían de manera apreciable al tiempo que tardarían en frenarse ni a su capacidad para ligar materia y comenzar a nuclear galaxias.*

¿DÓNDE ESTÁ EL GALLEGO?

Llegó a mis manos el número de enero de Investigación y Ciencia por el interés que me suscitó el artículo sobre lenguas indoeuropeas [«¿Cómo llegaron a Europa las lenguas indoeuropeas?», por Ruth Berger]. Me gustaría destacar dos aspectos.

Soy filóloga. El tema me interesa y leí el artículo con atención. Sin embargo, hubiera agradecido encontrar en él mejores aclaraciones sobre la terminología relacionada con la genética. Soy consciente de que sois una publicación científica, pero también divulgativa. En algunos momentos, el artículo me resultó difícil de seguir.

Por otro lado, en el árbol genealógico de lenguas latinas [los resultados publicados en 2003 en *Nature* por Russel Gray y Quentin Atkinson en 2003, que el artículo de Berger analiza en detalle]... ¡falta el gallego! Entiendo que quizá no puedan aparecer todas y cada una de las lenguas y dialectos. Pero me sorprende ver que se ha omitido una de las lenguas peninsulares cuando, por otro lado, sí se han incluido distinciones dialectales mucho más sutiles, como la existente entre el brasileño y el portugués.

Ariadna Babel
Barcelona

Responde Atkinson: *En nuestros resultados no aparecía el gallego debido a que los datos que introdujimos en nuestra simulación no incluían ese idioma. La base de datos de vocabulario comparado que empleamos fue recopilada por Isidore Dyen y sus colaboradores a principios de los noventa. Si alguien estuviera dispuesto a incorporar el gallego a la base de datos de Dyen, lo incluiríamos en nuestros análisis futuros.*



Enero 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

MATEMÁTICAS

Perspicacia animal

En tiempo reciente, los medios se han hecho eco de varias noticias que comparten un mensaje similar: los animales entienden de manera instintiva mejor que los humanos ciertas operaciones matemáticas. ¿Cuánta verdad esconden?

En el tristemente célebre problema de Monty Hall, así llamado en honor al presentador del concurso televisivo estadounidense *Let's make a deal*, las personas parecen quedar muy mal en comparación con las palomas. Un participante ha de elegir entre tres puertas, una de las cuales esconde un premio. Cuando ha escogido una de ellas, el presentador abre otra de las puertas, asegurándose de que sea una de las dos que no esconde ningún premio. Después, se le da al concursante la posibilidad de cambiar su elección. ¿Debería elegir la otra puerta?



La mayoría de la gente se mantiene firme en su primera opción. Se trata de la decisión equivocada, puesto que retractarse aumenta de 1/3 a 2/3 la probabilidad de ganar. (Si nos empeñamos en la primera puerta, habremos ganado solo si habíamos acertado desde el principio, un suceso que tiene una probabilidad de 1/3; pero, si cambiamos a la segunda, habremos ganado siempre que nuestra primera elección hubiese sido equivocada, lo que ocurrirá en 2/3 de las ocasiones.) Según un estudio reciente, incluso después de participar un gran número de veces y observar que cambiar de puerta duplica las probabilidades de ganar, las personas solo nos retractamos en 2/3 de las ocasiones. Las palomas lo hacen mucho mejor: después de varios intentos, acaban por decantarse siempre por la segunda posibilidad.

Las palomas aprenden. Pero ¿calculan o entienden algo? En absoluto. Como buenas empiristas, no hacen más que rendirse ante la evidencia. La gente, en cambio, da demasiadas vueltas al asunto y termina por confundirse.

Las abejas, que parecen encontrar el camino más corto que conecta las flores de un prado, constituyen otro ejemplo de aparente perspicacia animal. Incluso si el camino que siguen fuera en verdad el óptimo (y la única forma de comprobarlo sería medir todos los caminos posibles), no se podría afirmar que han dado con un algoritmo general, una tarea tan complicada que pertenece a un tipo de problemas denominados NP-complejos, insolubles en la gran mayoría de los casos. El itinerario de las abejas quizá sea una buena aproximación del camino más corto, pero no hay motivo para pensar que siempre logran dicha aproximación, ni mucho menos que obtienen la solución óptima para todas las situaciones posibles con un número indefinido de flores.

—John Allen Paulos

SELENOLOGÍA

Grafito en rocas lunares

Aunque el hombre no ha vuelto a pisar la Luna desde que el *Apolo 17* la visitase en 1972, parece que aquellas misiones aún deparan sorpresas. El análisis de una de las rocas recogidas entonces ha arrojado la primera prueba de la existencia de grafito en una muestra lunar.

El verano pasado, Andrew Steele, astrobiólogo en la Institución Carnegie de Washington, y sus colaboradores publicaron en *Science* el hallazgo de docenas de partículas y siete filamentos de grafito extraídos de una pequeña mancha oscura (de apenas 0,1 milímetros cuadrados) de una de las rocas que trajo el *Apolo 17*. En el pasado ya se habían aislado trazas de carbono procedentes del viento solar o en forma de otros compuestos, como algunos carburos. Pero el descubrimiento de cantidades de grafito de un tamaño notable supone un descubrimiento único.



Harrison Schmitt, tripulante del *Apolo 17* y último hombre en poner pie en la Luna, trajo muestras en 1972 que aún hoy siguen sorprendiendo.

Se estima que su origen podría hallarse en una gran lluvia de meteoritos acontecida hace unos cuatro mil millones de años, un episodio que ha dado en llamarse bombardeo intenso tardío. Según Steele, los fragmentos aislados ahora quizá constituyan el remanente del polvo liberado durante el impacto de un meteorito rico en carbono, aunque también podrían haber condensado a partir del gas producido en uno de esos impactos. De confirmarse la primera hipótesis, los cristales de grafito quizá sean restos intactos del meteorito que excavó la cuenca Serenitatis, cercana al lugar donde alunizó el *Apolo 17*.

Paul D. Spudis, del Instituto Lunar y Planetario de Houston, coincide en que es probable que se trate de los restos de algún impacto, pero puntualiza que podría ser uno distinto al que excavó la cuenca Serenitatis. Junto a otro colaborador, Spudis postuló en 1981 que las muestras recogidas por el *Apolo 17* quizá tuviesen su origen no en un único impacto, sino en varios.

Sea como fuere, los recursos científicos cosechados durante las misiones Apolo no se encuentran agotados en absoluto.

—John Matson

MARKUS BOTZEK, CORBIS (*paloma*); GETTY IMAGES (*paisaje lunar*)

SALUD PÚBLICA

Lucha mundial contra las enfermedades crónicas

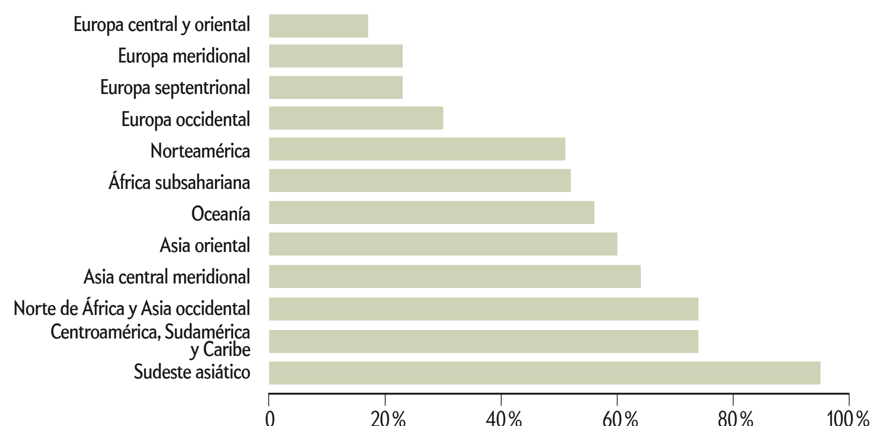
La comunidad sanitaria mundial ha cosechado numerosas victorias en su lucha contra las enfermedades infecciosas en las zonas más pobres del mundo. Erradicó la viruela en el decenio de los setenta y ha reducido al mínimo los casos de polio. En la actualidad la atención se centra en el cáncer y las enfermedades cardíacas. El Instituto de Medicina de Washington D.C. publicó hace poco un informe donde advertía que el aumento de las enfermedades cardiovasculares en los países con rentas medias y bajas está amenazando el bienestar económico de esas naciones. Y un grupo de médicos y personalidades públicas ha hecho un llamamiento en la revista *The Lancet* para extender el control y los cuidados contra el cáncer en los países pobres.

El nuevo interés responde a los cambios en las tendencias mundiales de las enfermedades. El cáncer y las cardiopatías no se limitan a los países desarrollados. Según la Agencia Internacional de Investigación contra el Cáncer, situada en Lyon, más de la mitad de los diagnósticos de cáncer en 2008 se produjeron en países en vías de desarrollo como Nigeria, Egipto y Brasil, en comparación con solo el 15 por ciento en 1970. El estudio de 2010 del Instituto de Medicina indicó que el 80 por ciento de los fallecimientos causados por ataques cardíacos, ictus y otras enfermedades cardiovasculares en todo el mundo se producen en los países subdesarrollados.

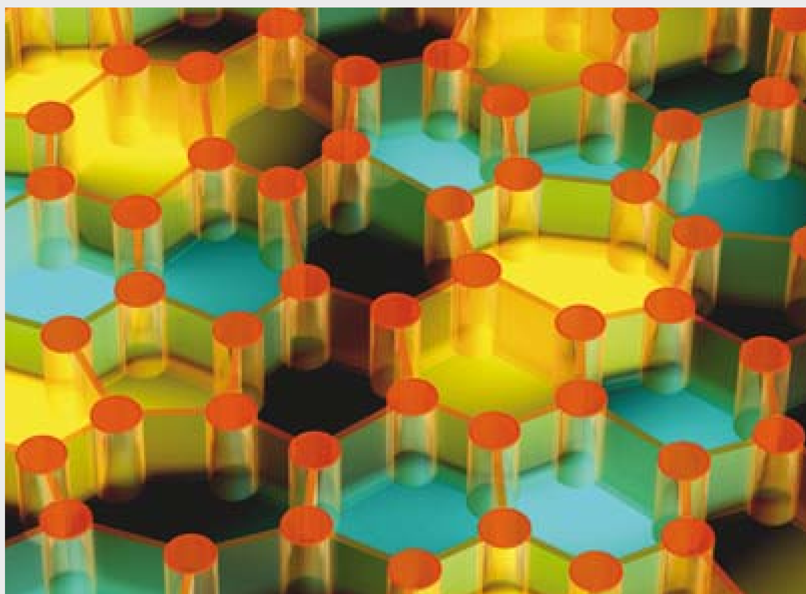
En cierto sentido, la creciente proporción de casos de cáncer está asociada a la prosperidad. Las personas viven más tiempo (el cáncer es más frecuente cuanto más se va envejeciendo) y fallecen menos por enfermedades infecciosas. De forma similar, el aumento de las afecciones cardiovasculares está vinculado al envejecimiento de la población, así como a la adopción de una dieta de estilo occidental y a la reducción del ejercicio físico. El tratamiento del cáncer en las zonas pobres no supone por fuerza un elevado coste, ya que muchos remedios antiguos, sustituidos por otros más caros en el mundo occidental, demuestran una gran eficacia. Lo mismo sucede con el tratamiento de las enfermedades cardiovasculares. Por desgracia, a menudo resulta difícil acceder a esos medicamentos antiguos en los países pobres que, además, sufren escasez de médicos, enfermeras y otros profesionales sanitarios.

—Christine Gorman

Previsión del aumento porcentual de muertes causadas por el cáncer (2002-2020)



¿QUÉ ES ESTO?



Orden a partir del caos. En la última edición de la exposición *El Arte de la Ciencia*, organizada por la Universidad de Princeton, se presentó un diseño novedoso de un material que ayudará a desarrollar circuitos más reducidos para dispositivos fotónicos compactos, que utilizan luz en lugar de electrones para transmitir información. Para desviar y guiar la luz en estos dispositivos, los ingenieros suelen crear cristales fotónicos, es decir, patrones regulares de orificios de escala nanométrica. Sin embargo, estos desvían la luz de forma diferente según el ángulo, mientras que los nuevos materiales, gracias a su estructura aleatoria, permitirían desviarla con cualquier ángulo sin perder información. Esta imagen generada por ordenador por el grupo de Paul J. Steinhardt, de la Universidad de Princeton, muestra redes de cilindros y paredes (*naranja*), que se fabricarían a partir de una capa de silicio. *—Ann Chin*

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD Y UNIÓN INTERNACIONAL CONTRA EL CÁNCER (*gráfica*); MARIAN FLORESCU, PAUL J. STEINHARDT Y SALVATORE TORQUATO (*fotografía*)

AGENDA

CONFERENCIAS

10 de marzo
La sinfonía inacabada de Einstein
José Antonio Font Roda,
Universidad de Valencia
Fundación Valenciana de Estudios Avanzados
Valencia
www.fvea.es

17 de marzo
Why the Nobel Prize in 2005?
Richard R. Schrock, Instituto de Tecnología de Massachusetts
Premio Nobel de Química 2005
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

24 de marzo – Coloquio
Maths is everywhere
John D. Barrow, Universidad de Cambridge
Universidad de Zaragoza
Zaragoza
www.rsme.es/centenario

EXPOSICIONES

Anfibios y reptiles de España
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



Una autopista detrás del enchufe
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logro-o.org/casadelasciencias

OTROS

6 de marzo – Visita teatralizada
Museo de Arqueología de Cataluña
Puig de Sant Andreu (poblado ibérico)
Ullastret
www.mac.cat/cat/Seus/Ullastret

19 y 20 marzo – Varias actividades
Fiesta de la meteorología
Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

QUÍMICA

La increíble espuma comestible



Si usted comienza la mañana con un cappuchino y termina la tarde con una cerveza, su día empieza y acaba con uno de los aspectos más intrigantes de la química culinaria: la espuma. Convertidas en una de las áreas más fértiles de la innovación gastronómica, sus burbujas esconden propiedades que los matemáticos aún no comprenden del todo.

Ferran Adrià comenzó a experimentar con ellas a mediados de los noventa. Para crear espumas a partir de alimentos tan variados como el bacalao, el *foie gras*, las setas o las patatas, Adrià empleó agentes espumosos poco tradicionales, como la gelatina o la lecitina, así como sifones de óxido nitroso presurizado. Más tarde, otros chefs de renombre como Heston Blumenthal, Wylie Dufresne o Grant Achatz también se sumarían a la revolución de las espumas culinarias.

Sus platos gozan un aura mística. Y no solo por su textura. Aunque una espuma parezca un revoltijo aleatorio, sus burbujas se autoorganizan según ciertas leyes que Joseph Plateau, físico belga, observó por primera vez en 1873. En primer lugar, cuando las películas del material que compone la espuma coinciden a lo largo de una línea, lo hacen siempre en grupos de tres. No cuatro ni cinco; siempre tres. Además, en esas uniones, el ángulo que forman dos películas cualesquiera es siempre de 120 grados. Por último, cuando varias de esas líneas de intersección se unen a su vez en un punto, lo hacen siempre en grupos de cuatro, y el ángulo que forman dos a dos en dicho punto toma siempre el valor $\arccos(-1/3)$, unos 109,5 grados.

Sólo un siglo más tarde, en 1976, Jean Taylor, matemático de la Universidad de Rutgers, demostró que las reglas de Plateau se derivaban del hecho de que la geometría que adoptan las burbujas tiende a minimizar la superficie total que ocupan. Pero si bien ello explica la geometría local en las intersecciones, no predice la forma global que ha de adoptar cada burbuja. Desde entonces, los matemáticos siguen preguntándose qué geometría han de exhibir las burbujas de una espuma para llenar un recipiente con la mínima cantidad de sustancia. En 1887, Lord Kelvin conjeturó que la espuma óptima era aquella en la que todas sus burbujas tomaban la forma de octahedros truncados (un poliedro de 14 caras: 6 cuadrados y 8 hexágonos equiláteros). Sin embargo, en 1994, Dennis Weaire y Robert Phelan, del Trinity College de Dublín, hallaron una solución mejor: una espuma cuyas burbujas adoptaban alternativamente la forma de dos poliedros irregulares y que llenaba el espacio con menor cantidad de material que la espuma de Kelvin. A día de hoy, nadie sabe si existe una solución mejor [*véase* «Espumas óptimas», por N. Treitz; Investigación y Ciencia, mayo de 2010].

En los alimentos espumosos, las burbujas que no satisfacen las leyes de Plateau explotan con rapidez. Lo mismo sucede con las burbujas demasiado pequeñas: la tensión superficial aumenta la presión interior más allá del punto de ruptura. Es por ello por lo que las espumas líquidas pierden sus finos detalles a medida que pasa el tiempo... y por lo que es mejor beberse el cappuchino recién hecho.

—W. Wayt Gibbs y Nathan Myhrvold

Errata corrige

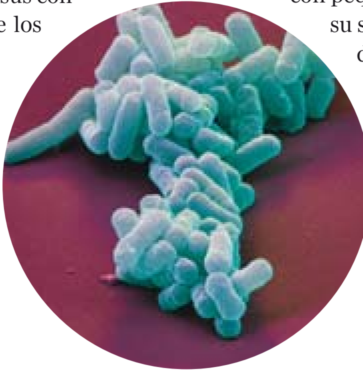
En el artículo «El conjunto de Mandelbrot en tres dimensiones» [Investigación y Ciencia, febrero de 2011], la autoría de la doble imagen de las páginas 50 y 51 se atribuye erróneamente en el epígrafe a David White. El verdadero nombre del autor es Daniel White.
En el mismo artículo, en página 54, segunda columna, undécima línea, se han omitido las últimas palabras de la frase: «[...] como seres tridimensionales que somos, no poseemos la capacidad para visualizar un espacio *de cuatro dimensiones*».

MICROBIOLOGÍA

Gérmenes altruistas

El mundo está lleno de buenos samaritanos; podemos hallarlos hasta en nuestro propio cuerpo. James J. Collins, de la Universidad de Boston, ha descubierto que un pequeño número de bacterias resistentes a los medicamentos ayudan a sus congéneres más vulnerables a tolerar la acción de los antibióticos, aunque ese gesto tiene un precio.

El grupo de Collins introdujo cantidades crecientes de un antibiótico en un cultivo de *Escherichia coli*, algunas de cuyas cepas colonizan el aparato digestivo de humanos y animales, y causan enfermedades. El análisis periódico del grado de resistencia al medicamento reveló un efecto inesperado: aunque toda la población prosperaba en presencia del medicamento, solo algunas de las bacterias eran realmente resistentes al mismo. «Verificamos con sorpresa que la resistencia individual de las bacterias era muy inferior a la de la población en su conjunto», señala Collins, quien publicó hace poco los resultados en *Nature*. Nuevos análisis indicaron que los mutantes resistentes segregaban indol, una molécula que inhibe su propio crecimiento pero ayuda al resto de la población a sobrevivir al activar en ella los sistemas de bombeo de las membranas celulares que eliminan el medicamento.



Algunos individuos de ***E. coli*** **(*en la foto*) protegen a sus congéneres. Este hallazgo tal vez ayude a desarrollar medicamentos más eficaces e «inteligentes».**

Los hallazgos podrían contribuir al desarrollo de antibióticos más eficientes. Si el indol favorece la resistencia a los antibióticos, esta se podría evitar bloqueando la señalización del indol con pequeñas moléculas. Por otro lado, tras comprobar su seguridad, cabría la posibilidad de utilizar algún día el indol, o un tratamiento basado en el mismo, para que las bacterias beneficiosas desplazaran a las patógenas en los aparatos digestivo o urinario, opina Mark Anderson, director científico de NovaBay Pharmaceuticals, en Emeryville, California, empresa que desarrolla medicamentos contra las infecciones resistentes a los antibióticos.

Los resultados podrían también cambiar la forma en que los médicos estudian las infecciones. Una población de bacterias puede adquirir resistencia a los antibióticos, aunque solo un número reducido de ellas posean las mutaciones que la confieran. De ahí que al obtener y analizar pequeñas muestras bacterianas de los pacientes podría infravalorarse la resistencia de la infección en su conjunto. Según Collins, estos organismos unicelulares funcionan en cierto modo como un organismo pluricelular, por lo que las muestras aisladas podrían no ser representativas del conjunto. *—Melinda Wenner Moyer*

MINERALOGÍA

El diamante, ¿joya o mineral?

Un diamante es para toda la vida. Igual como el zafiro, la sílice y el poliestireno extruido. Representa la sustancia más dura conocida de la naturaleza, lo que hace de ella un excelente material para herramientas de corte pero no explica su valor como símbolo amoroso. Aunque los diamantes se hayan formado bajo el calor y la presión del manto terrestre hace miles de millones de años, su incidencia en el mundo actual tiene un origen mucho más reciente.

En 1870 las prospecciones mineras británicas en Sudáfrica descubrieron enormes yacimientos de diamantes. Hasta entonces, el mineral se consideraba un artículo de lujo, extraordinariamente raro; los nuevos hallazgos amenazaban con inundar de gemas el mercado y hundir su precio. Los que invertían en las minas decidieron consolidar sus intereses mediante el control del flujo de diamantes en el mercado libre. Para ello crearon en 1888 el consorcio De Beers Consolidated Mines Ltd. Al retener en depósito sus mercancías para mantener elevados los precios, De Beers consiguió controlar el suministro mundial de diamantes durante el siglo siguiente.



Otra de las artimañas consistió en atizar la demanda. En 1938, De Beers encargó a la empresa estadounidense N. W. Ayer la primera campaña publicitaria no orientada a vender un artículo concreto, ni a atraer clientes a un determinado centro comercial, sino a vender una idea: el diamante como único símbolo de amor imperecedero, y cuyo tamaño mediría la intensidad del amor. La compañía insertaba en periódicos y revistas noticias que resaltaban el tamaño de los diamantes que se regalaban entre sí las estrellas de cine, así como anuncios a todo color de famosos que hacían resplandecer sus gemas para cimentar esa asociación. El eslogan «un diamante es para siempre» se introdujo en 1949, y dado que entonces la generación de posguerra ya tenía edad de casarse, el anillo de compromiso con diamantes se convirtió en signo insustituible de alianza amorosa y de prestigio.

A principios del pasado decenio, la legislación antimonopolio recortó el poder de De Beers en el mercado de diamantes y le obligó a terminar con su práctica de retención de los minerales. Pero su función ha sido reemplazada por Alrosa, empresa que pertenece al Gobierno ruso en un 90 por ciento y que en 2009 se convirtió en el mayor productor mundial de diamantes. Alrosa, preocupada por la caída de los precios en la recesión global, no ha vendido ni una gema en el mercado libre desde diciembre de 2008. Andrei V. Polyakov, portavoz de la empresa, lo explicaba así al *New York Times*: «si no puedes mantener su precio, el diamante se convierte en una simple piedra de carbono».

—Michael Moyer

PHOTO RESEARCHERS, INC. (*E. coli*); DON FARRALL, GETTY IMAGES (*diamante*)

BIOLOGÍA

Genética de la simbiosis micorrícica

Estudio de *Laccaria bicolor* mediante silenciamiento por ARN

La simbiosis micorrícica corresponde a una asociación mutualista antigua entre hongos y raíces de la mayoría de las plantas terrestres. En los ecosistemas naturales, la adquisición de los nutrientes por la planta desde el suelo se produce a través del micelio extrarradical de los hongos simbióticos, los cuales obtienen de la planta hidratos de carbono derivados de la fotosíntesis. Dicha asociación también incrementa la eficacia biológica de la planta al aumentar la disponibilidad de agua, la tolerancia a metales pesados y la resistencia a patógenos.

La mayoría de plantas herbáceas y árboles tropicales se hallan asociados en interacciones endomicorrícicas, es decir, mediante hifas fúngicas que penetran en las paredes celulares de la planta huésped. Los árboles de las zonas boreales y templadas, en cambio, suelen formar ectomicorrizas (ECM), simbiosis en las que las hifas crecen sólo a nivel intercelular, sin penetrar en las paredes celulares del huésped. En este último grupo se incluyen la mayoría de árboles de importancia económica: pinos, píceas, abedules, álamos y robles, entre otros. Por su parte, los hongos ectomicorrícicos pertenecen sobre todo a los basidiomicetes filamentosos. A pesar de su gran importancia ecológica y económica, la comprensión actual sobre el reconocimiento entre el huésped y el micosimbionte, y sobre la formación y funcionamiento de los órganos simbióticos, es limitada.

Dificultades técnicas

Durante el último decenio, el uso de técnicas moleculares avanzadas ha permitido ahondar en la genética de la interacción ectomicorrícica. En 2004, el Instituto de genómica del Departamento de energía estadounidense (JGI, de Joint Genome Institute) decidió secuenciar el genoma de los micobiontes de álamo, el primer árbol con su genoma resuelto. La investigación micorrícica entraba así en la era genómica. Fruto de la colaboración entre el JGI y el Consorcio para el Genoma de *Laccaria* (*Laccaria* Genome Consortium), se determinó el genoma del hongo basidiomicete ectomicorrícico *Laccaria bicolor*, en concreto la cepa S238N-H82.



Laccaria bicolor

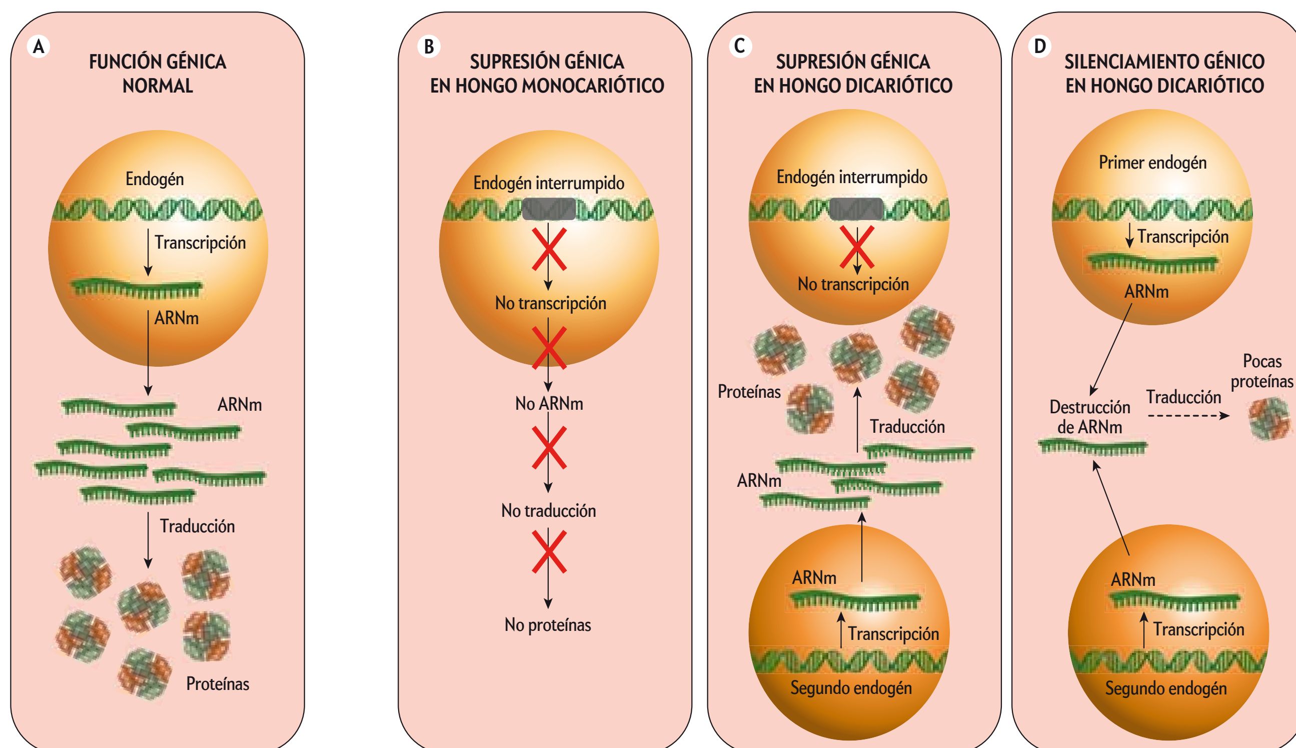
CORTESIA DE JOSE M.ª AUSIN (*Laccaria bicolor*)

El de *Laccaria* es el primer genoma simbiótico fúngico secuenciado. El mismo ha facilitado el estudio de los perfiles de expresión génica durante los estadios de desarrollo de la simbiosis ECM, trabajos que han arrojado nueva luz sobre la interacción entre la planta y el hongo. Sin embargo, la investigación actual sobre la interacción ectomicorrícica topa con un obstáculo técnico importante. Para conocer la relevancia biológica de los genes fúngicos regulados en la simbiosis (para la mayoría de los cuales se desconoce su función) se requieren métodos de genética inversa. Dichas herramientas deben permitir, por un lado, una transformación genética reproducible y de alta eficiencia; por otro, alterar el nivel de expresión de los genes de una forma dirigida en el micelio dicariótico, la fase simbiótica del ciclo biológico del hongo.

La modificación genética de los basidiomicetes filamentosos no es tarea fácil. Ello se debe, por una parte, a que los métodos tradicionales utilizados para transformar hongos se basan en la obtención y regeneración de protoplastos (células cuyas paredes han sido eliminadas), la cual es sumamente engorrosa en hongos de este grupo. Por otra parte, la manipulación dirigida de los genes es difícil de llevar a cabo debido a la baja tasa de recombinación homóloga que presentan estos organismos. Asimismo, la naturaleza dicariótica del micelio simbiótico dificulta la generación de mutantes nulos en hongos basidiomicetes ectomicorrícicos, dado que deben inactivarse, por recombinación homóloga, dos copias del gen en cuestión.

En nuestro laboratorio hemos desarrollado una técnica de transformación genética de alto rendimiento para *Laccaria*. Esta técnica, denominada TMA (transformación mediada por *Agrobacterium*), explota la capacidad de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* de transferir genes a otros organismos, un hongo en este caso, para la obtención de organismos transgénicos; se basa en la introducción de resistencia al antibiótico higromicina B.

Esa transferencia de genes permite la manipulación directa de micelio vegetativo intacto, evitando la necesidad de la preparación de protoplastos. La integración del transgén mediante TMA presenta un patrón sencillo; genera sobre todo integraciones simples. Los genes introducidos suelen integrarse sin preferencias



En la función génica normal (*A*) existe un flujo de información entre el gen y su producto final, una proteína. Este flujo implica primero la transcripción génica en moléculas de ARN mensajero (ARNm) dentro del núcleo de la célula eucariótica (*naranja*) y la posterior traducción de éstas en el citoplasma celular (*rosa*). Para interrumpir dicho flujo, podemos recurrir a la supresión génica (*knock-out*) o al silenciamiento génico (*knock-down*). En la supresión génica (*B*) se produce una recombinación homóloga del endogén con un transgén no funcional; ello impide la transcripción en ARN y, por tanto, la obtención de proteínas. En los organismos dicarióticos (*C*), esta técnica no basta para impedir la expresión de un gen, puesto que éstos cuentan con dos núcleos en cada célula (*naranja*). Se recurre entonces al silenciamiento por ARN (*D*), que interfiere en la síntesis proteica mediante la destrucción específica de las moléculas de ARNm.

hacia ninguna secuencia nucleotídica. Sin embargo, las cepas transgénicas dicarióticas recuperadas bajo la presión selectiva muestran un desvío notable hacia la integración en secuencias génicas.

Silenciar, mejor que suprimir

Debido a que la tasa de recombinación homóloga de *Laccaria* es extremadamente baja, se descartó el uso de la técnica de supresión génica (*knock-out*). Para la modificación dirigida del nivel de expresión génico en el micelio dicariótico se evaluó un método alternativo: el silenciamiento por ARN.

El silenciamiento por ARN consiste en la degradación de ARN mensajero (ARNm) de una forma dependiente de secuencias homólogas. Se basa en un mecanismo celular antiguo de las células eucariotas, que habría sido seleccionado evolutivamente como un mecanismo de protección contra la invasión de ácidos nucleicos víricos. En distintos organismos eucarióticos, incluidos los hongos, la vía de silenciamiento por ARN puede activarse de forma artificial, mediante la introducción de ARN de doble cadena en forma de horquilla (ARNh) con homología de secuencia a un ARNm blanco, lo que causa la degradación específica de este último (*knock-down*).

El silenciamiento por ARN puede actuar también a nivel del citosol celular, degradando ARNm originados incluso a partir de varias copias génicas presentes en un mismo o en distintos núcleos. Nos referimos al silenciamiento génico postranscripcional. Ofrece una manera rápida y eficiente de alterar la expresión génica en organismos multicelulares poliploides, diploides y dicarióticos.

Se usó el gen de la nitrato reductasa (*Lbnr*) a modo de gen de prueba. Se silenció con éxito mediante la expresión transgénica de ARNh vía TMA. El silenciamiento por ARN causó modificaciones epigenéticas, lo que sugiere una conexión entre el silenciamiento por ARN y la metilación de ADN en *Laccaria*. La variación en la fuerza de silenciamiento génico mostró correlación con los sitios genómicos de integración, pero no con el número de transgenes integrados: las integraciones en las secuencias de los genes altamente activos generó la respuesta de silenciamiento más intensa. Por tanto, el desvío en la integración de los transgenes hacia regiones codificantes producido por la metodología de transformación utilizada sugiere que TMA es altamente compatible con el uso del silenciamiento por ARN en *Laccaria*.

El silenciamiento de *Lbnr* también produjo un fenotipo fúngico no micorrizante con álamo utilizando nitrato como fuente de nitrógeno. Sin embargo, la capacidad simbiótica del hongo fue restaurada por amonio o una fuente de nitrógeno orgánico.

Nuestros resultados constituyen la primera prueba genética de que la eficacia del metabolismo del nitrógeno del hongo desempeña una función crucial en el establecimiento de la simbiosis ectomicorríci-

ca. Además, sugieren que es la planta quien controla la interacción, de modo que no permite al hongo consumir fotosintatos sin ofrecer cierta cantidad compuestos nitrogenados al huésped (evita el parasitismo). Asimismo, la investigación demuestra que el silenciamiento de genes por ARN en *Laccaria* constituye una herramienta poderosa para el estudio de la interacción ectomicorrícica.

—Minna J. Kemppainen
y Alejandro G. Pardo
Laboratorio de micología molecular
Departamento de ciencia y tecnología
CONICET-Universidad Nacional de Quilmes, Argentina

ASTROFÍSICA

La luz ultravioleta de las galaxias Seyfert

El agujero negro supermasivo del centro galáctico es fuente de fenómenos de muy alta energía. Su observación permite ahondar en los procesos de evolución de las galaxias

Hoy en día sabemos que la mayoría de las galaxias que superan cierto tamaño poseen un agujero negro supermasivo en su centro. Dichos agujeros negros, con masas de entre un millón y mil millones de veces la masa del Sol, son objetos extremadamente compactos y cuya gravedad afecta solo al centro galáctico de una forma local.

Por su parte, el bulbo galáctico que los rodea (formado por un conjunto de estrellas de órbitas desordenadas y que adopta una geometría elipsoide) se extiende varios miles de años luz más allá del núcleo. Sabemos que ha de existir un vínculo entre la formación y crecimiento del bulbo galáctico y la del agujero negro central, pero no conocemos sus características con exacti-



TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (NGC 5135)

El centro de la galaxia NGC 5135 es rico en zonas de formación estelar y cúmulos estelares jóvenes, cercanos al núcleo activo Seyfert y muy brillantes en el ultravioleta. La imagen muestra una composición en colores artificiales en función de las bandas: ultravioleta cercano (*azul*), luz visible (*verde*) e infrarrojo cercano (*rojo*).

tud. La pregunta es: ¿cómo se relacionan las propiedades galácticas globales (en este caso, las del bulbo) con otras locales (las del agujero negro)?

A lo largo de su evolución, las galaxias exhiben períodos de actividad nuclear y fases de reposo. Los núcleos galácticos activos constituyen uno de los fenómenos más energéticos del universo. El origen de esa energía se debe a la acreción del gas circundante por parte del agujero negro supermasivo. Ello quiere decir que, durante la fase de actividad, el agujero negro está creciendo.

Por otro lado, las formas en que puede crecer el bulbo galáctico son fundamentalmente dos: bien mediante un proceso de fusión galáctica (cuando una galaxia asimila a otra tras una colisión), o bien mediante la formación de estrellas en la propia galaxia y su posterior evolución dinámica hacia órbitas desordenadas. Es por ello por lo que el estudio de los procesos de formación estelar en la zona nuclear de galaxias activas se muestra de suma importancia.

La radiación ultravioleta constituye una ventana privilegiada para estudiar los fenómenos de formación estelar, ya que las estrellas masivas y los cúmulos de estrellas jóvenes que abundan en las regiones de formación estelar emiten con gran intensidad en esta longitud de onda. Además, el contraste con la población de estrellas de los bulbos galácticos, formados principalmente por estrellas viejas y rojas, es mayor en el ultravioleta. No obstante, cuando deseamos detectar esta radiación desde la Tierra, topamos siempre con un inconveniente fundamental: el gran coeficiente de absorción en el ultravioleta que presenta la atmósfera terrestre. Por ello resulta necesario recurrir a observaciones desde el espacio. A este respecto, el telescopio espacial Hubble se ha convertido en una herramienta fundamental. Gracias a él hemos pasado de estudiar solamente las propiedades globales de la zona nuclear a analizar la población de cúmulos estelares en la vecindad del núcleo, lo que permite determinar numerosas propiedades de objetos concretos.

Nuestro equipo del Instituto de Astrofísica de Andalucía se encuentra realizando un análisis detallado de una muestra de galaxias Seyfert cercanas. Por galaxias Seyfert se conoce a un tipo particular de núcleos activos que destacan por la intensidad de su brillo en el espectro de luz visible. Además, muchas de estas galaxias se hallan lo bastante cerca como para que resulte posible apreciar los componentes del núcleo.

Un componente característico lo constituye un núcleo compacto y brillante, visible siempre que no exista una capa densa de polvo que cubra el centro galáctico. Otro componente frecuente son los cúmulos estelares masivos y las regiones compactas de formación estelar. Hemos encontrado este tipo de objetos en un 60 por ciento de las galaxias estudiadas, lo que indica la presencia de formación estelar relativamente reciente y a menudo violenta. A todo ello hay que añadir una componente de luz ultravioleta difusa. A esta pueden contribuir diversos fenómenos, como una población de estrellas dispersas, gas ionizado por la radiación generada en torno al disco de acreción, o esta misma radiación dispersada por el gas y polvo del medio interestelar. El análisis simultáneo de varias bandas permite aislar los mecanismos que contribuyen a esta emisión difusa en las galaxias individuales. Si bien los fenómenos en el entorno de los núcleos activos son variados y complejos, el estudio detallado de amplias muestras nos está permitiendo entender la manera en que la actividad nuclear afecta al entorno y viceversa.



Esta imagen de la galaxia NGC 1566, situada a unos 60 millones de años luz, fue tomada por el telescopio espacial Spitzer en 2005. Se han asignado colores falsos: la luz azul revela la presencia de estrellas de edad avanzada y la luz roja de los brazos indica las regiones de formación estelar y de emisión de polvo. El núcleo azul, muy luminoso, indica que se trata de una galaxia Seyfert.

Este es uno de los muchos interrogantes que nos quedan por desvelar sobre la evolución de las galaxias. Sin duda, la nueva generación de telescopios espaciales, como el futuro telescopio espacial James Webb (sucesor del Hubble) en el infrarrojo o el World Space Observatory, en el ultravioleta, arrojarán más luz sobre este tema.

—Víctor Manuel Muñoz Marín
Instituto de Astrofísica de Andalucía
CSIC

LINGÜÍSTICA

Chasquidos de la lengua

Ultrasonidos para codificar idiomas en peligro de extinción

NASA/CORTESIA DE NASAIMAGES.ORG

Amanda Miller sostiene un dispositivo cilíndrico bajo la barbilla de una anciana de Upington, en Sudáfrica. «Hable», pide Miller en la lengua nativa de la mujer, el idioma N|uu (la barra en el nombre de estos idiomas representa un chasquido consonántico, una clase de fonemas inexistente en nuestras lenguas). A medida que la mujer pronuncia las palabras, una pantalla muestra el movimiento de su lengua. La obtención de esas imágenes se basa en el empleo de ultrasonidos: desde hace un tiempo, los expertos investigan los idiomas en peligro de extinción con la misma técnica que usan los ginecólogos para seguir un embarazo.

En el estudio de la fonética resulta esencial conocer los movimientos de la lengua al hablar. Miller, profesora visitante en la Universidad estatal de Ohio, se encuentra entre los aproximadamente

40 lingüistas de todo el mundo que recurren a los ultrasonidos para sus investigaciones. La técnica, accesible a los lingüistas desde el año 2000, es una de las pocas que lo logran. La resonancia magnética no sirve, puesto que resulta demasiado lenta. En el pasado se emplearon rayos X y dispositivos electrónicos adheridos a la lengua, pero los rayos X exponían al sujeto a radiaciones perjudiciales y las sondas electrónicas eran poco prácticas. Diana Archangeli, profesora de lingüística en la Universidad de Arizona, explica que los probandos se ponían nerviosos si debían hablar con un pequeño aparato pegado a la lengua. En 2004, Archangeli también comenzó a trabajar con ultrasonidos.

La técnica ha permitido documentar algunos de los sonidos más rápidos del habla humana: los chasquidos consonánticos, los *clics* tan característicos de algunas lenguas africanas. Debido a que los expertos desconocían cómo se emitían tales fonemas, estos quedaron relegados a una especie de cajón de sastre del alfabeto fonético internacional (un catálogo de sonidos de todos los idiomas del mundo que sirve a los lingüistas para estudiar las relaciones entre fonemas y profundizar en los orígenes de pueblos y lenguas).

Miller ha tipificado más de 40 chasquidos consonánticos. Su investigación, publicada en 2009, los clasificó según los parámetros empleados habitualmente en fonética, como la iniciación (zona desde la que procede el flujo de aire), el punto de articulación (donde se contrae el tracto vocal) y el modo de articulación. Ello permitió incorporar los chasquidos consonánticos al alfabeto fonético internacional. Según Miller, ello posibilita la comparación con sonidos más familiares: por ejemplo, la pronunciación inglesa de la «t» o la «k» comparte características con los chasquidos consonánticos.

Otros lingüistas utilizan los ultrasonidos para enseñar idiomas o para ayudar a los sordos a aprender a hablar. Miller, por su parte, planea continuar sus investigaciones sobre las lenguas en peligro de desaparición y seguir incorporando sonidos al alfabeto fonético internacional.

—Lisa Song

MEDIOAMBIENTE

La importancia ecológica de la trashumancia

La desaparición de esta práctica ganadera tradicional compromete la conservación de paisajes, hábitats, especies y razas

La trashumancia constituye un sistema tradicional de manejo del ganado que consiste en el movimiento estacional y cíclico de los rebaños en busca de pastos. Esta antigua actividad ganadera (se remonta a entre 2000 y 4000 años a.C.) está presente sobre todo en regiones con una marcada estacionalidad del clima, como el área mediterránea (España, Portugal, Grecia e Italia), y también en montañas del centro y norte de Europa, y Asia. En definitiva, la trashumancia se ha desarrollado allí donde las diferencias climáticas y orográficas han favorecido un desarrollo del pasto asincrónico en el espacio y en el tiempo, ya que el desplazamiento del ganado permite optimizar su aprovechamiento.

En numerosas ocasiones, esos desplazamientos, realizados tradicionalmente a pie, transitaban por una compleja red de caminos de hasta 75 metros de anchura (cañadas) que conectaban los pastos de invierno de las zonas bajas con los de verano, ubicados en los principales sistemas montañosos de Europa y Asia. En el caso de España esta red de caminos, la más extensa de Europa, se extiende a lo largo de casi 125.000 kilómetros de cañadas, cordeles y veredas; cubre el uno por ciento de la superficie del territorio y conecta importantes áreas naturales, como las dehesas de Extremadura con la cordillera Cantábrica, Sierra de Gredos y Sistema Ibérico, el valle del Ebro con los Pirineos, y Sierra Morena con el Sistema Ibérico.

El mayor esplendor de la trashumancia se alcanzó entre los siglos XVI y XVIII, con el comercio internacional de lana de oveja merina, que España monopolizó durante siglos. En ese tiempo, por las cañadas, protegidas desde el siglo XIII tras la aparición de La Mesta, transitaban dos veces al año hasta 3,7 millones de ovejas merinas, pero también otras razas autóc-



Rebaño trashumante de ovejas merinas procedente de Extremadura, que aprovecha la elevada productividad de los pastos de montaña (puertos) de la cordillera Cantábrica durante el verano.

tonas de oveja (lacha), vaca (avileña, asturiana y tudanca) y cabra (verata, serrana), junto con perros (mastín, careas) y equinos.

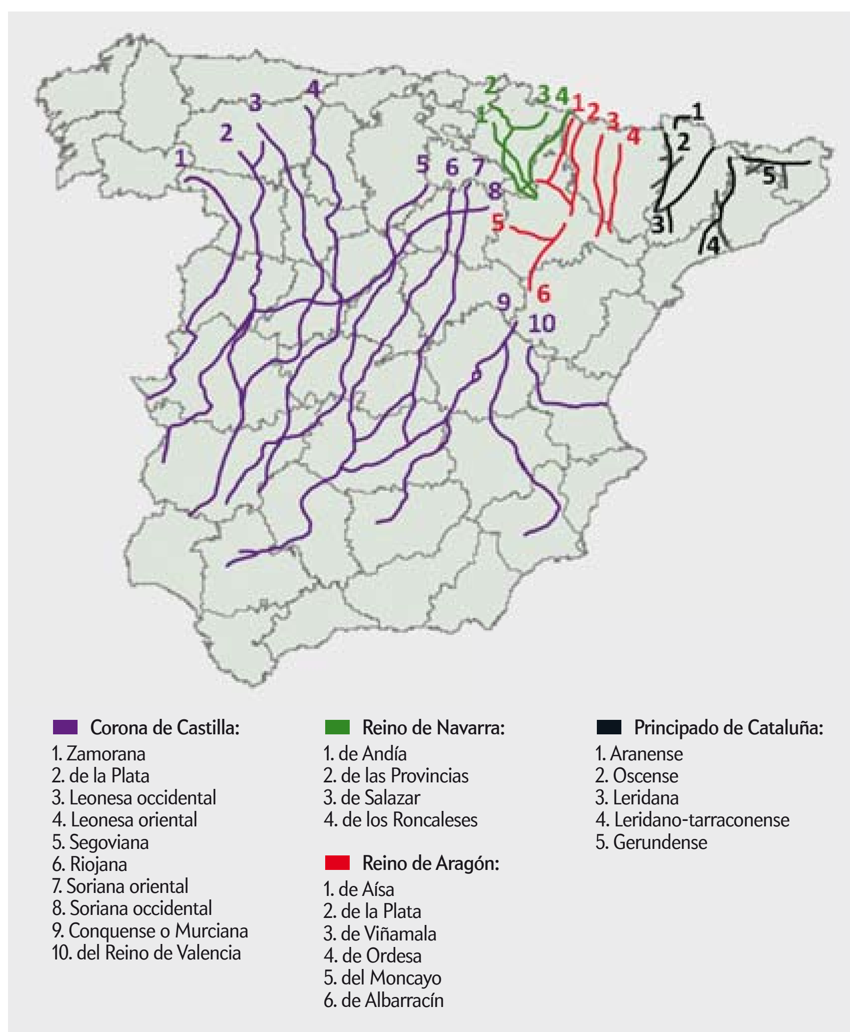
Valor ecológico

Aparte del valor cultural, social y económico de la trashumancia (esta práctica constituye el principal modo de vida en ciertas regiones de Asia), los beneficios para la conservación de los ecosistemas naturales son numerosos y variados, aunque todavía poco conocidos. Estos beneficios adquieren valor añadido en el contexto actual de intensificación de la producción agropecuaria.

Gran parte de las áreas europeas donde se desarrolló la actividad trashumante durante siglos y aquellas en dónde todavía está presente en la actualidad son consideradas de alto valor natural (*HNV farmlands*) por la Unión Europea y forman parte de la Red Natura 2000. Y es que la actividad trashumante ha dado lugar a una diversidad de paisajes y hábitats de gran valor ecológico, altamente apreciados socialmente, como las dehesas ibéricas o los paisajes alpinos y subalpinos. En las áreas de montaña, la actividad ganadera tradicional ha sido reconocida y subvencionada en países como Suiza, donde sus paisajes alpinos, modelados durante siglos por la actividad ganadera, constituyen la seña de identidad del país y base de la economía, el turismo y la biodiversidad.

El ganado ejerce una función notable en el mantenimiento de los ecosistemas de montaña, pues contribuye al control de incendios forestales y desastres naturales, como las avalanchas de nieve y los corrimientos de tierra. Cabe destacar que ciertos hábitats de pastizal considerados prioritarios por la UE solo pueden ser mantenidos por el pastoreo. El mantenimiento de pastos y paisajes abiertos en zonas de montaña por efecto del pastoreo beneficia a algunas especies de vertebrados amenazadas como la chova piquirroja o el águila real.

La cabaña ganadera trashumante en los puertos de montaña es además un recurso trófico básico para el buitre leonado, un carroñero con una importante función ecológica. Este recurso puede ser también aprovechado por otros carroñeros facultativos amenazados como el alimoche común, el oso y el lobo. La compatibilidad de la actividad trashumante con la presencia de grandes depredadores como el lobo ha sido posible gracias la adaptación a este sistema pastoril del



Principales vías pecuarias en España creadas durante el siglo XIII. En la actualidad conectan áreas de gran valor ambiental.

perro mastín, que protege a los rebaños de los ataques de aquel.

Mediante el uso estacional de los pastos no solo se consigue un mejor aprovechamiento de los mismos, sino que también se garantiza la sostenibilidad del recurso al evitar la sobreexplotación. Hallamos un ejemplo de ello en las dehesas ibéricas, estrechamente ligadas a la actividad trashumante, que minimizan el impacto del pastoreo desplazando el ganado a los pastos de montaña (puertos) durante los meses estivales, cuando la ausencia de agua hace a la dehesa más vulnerable [*véase* «La dehesa», por Angel Puerto; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1997]. Estas dehesas ofrecen hoy un hábitat idóneo a especies altamente amenazadas como el águila imperial o el buitre negro.

Las cañadas operan a modo de corredores ecológicos. Facilitan la dispersión y comunicación entre ecosistemas. Cañadas, cordeles y veredas constituyen espacios de gran biodiversidad, asociada sobre todo a la diversidad vegetal, por el contacto entre hábitats distintos adyacentes (ecotonía) y porque no han sido nunca roturadas —salvo por usurpación— ni tratadas con pesticidas. La biodiversidad de estas vías se ve potenciada por la función del ganado como agente dispersante de semillas, el efecto de la herbivoría y la fertilización por excrementos. Además, sirven como hábitat de alimentación, nidificación y refugio para la fauna. La trashumancia ofrece, pues, un sistema ventajoso en el contexto actual por su flexibilidad y capacidad de adaptación a las condiciones climáticas cambiantes.

Un patrimonio en peligro

En la actualidad, la actividad trashumante se halla en declive en toda Europa. A comienzos del s. XX, la progresiva sustitución de los desplazamientos a pie por

los traslados en tren supuso la desaparición de gran parte de las cañadas, que fueron invadidas por cultivos o construcciones. Las duras condiciones de trabajo, junto con la baja rentabilidad de las explotaciones agrarias y un escaso apoyo administrativo han ido reduciendo de forma progresiva la cabaña de ovino trashumante; ello ha conducido a la sobreexplotación de las dehesas, el abandono de numerosos puertos de montaña o a la sustitución del mismo por ganado bovino. En la montaña leonesa, de gran tradición trashumante, la presencia de ovino trashumante disminuyó en un 62 por ciento entre 1989 y 2007.

La desaparición de razas de ganado creadas o asociadas con la trashumancia constituye otro problema añadido, no solo por su significado ecológico, sino por su valor cultural y genético.

Las nuevas políticas ambientales, europeas y nacionales, apuestan por la explotación sostenible de los recursos naturales y el desarrollo rural. En este marco, la conservación y potenciación de sistemas productivos sostenibles como la trashumancia debería ser prioritaria. Para ello debería de integrarse esta actividad tradicional en un contexto agrícola multifuncional, dotándola de nuevos usos como el ecoturismo o la producción de alimentos de calidad reconocidos, y valorando sus beneficios ambientales.

—Pedro P. Olea
Facultad de biología
Universidad IE, Segovia

—Patricia Mateo Tomás
Departamento de biodiversidad y gestión ambiental
Universidad de León

BIOLOGÍA REPRODUCTIVA

Asexualidad, la vía más rápida para proliferar

Un reciente estudio en un pequeño invertebrado acuático, un rotífero, demuestra las ventajas evolutivas a corto plazo de la reproducción asexual

La existencia del sexo supone un enigma para los biólogos evolutivos, por una simple razón: la reproducción asexual parece ser mucho más eficiente. En primer lugar, porque los organismos que la presentan no necesitan crear machos. Una hembra con reproducción sexual produce la mitad de hijas que otra con reproducción asexual, fenómeno conocido como «doble coste del sexo». Otra ventaja importante de la asexualidad reside en la ausencia de recombinación genética (intercambio de genes entre cromosomas durante la formación de los gametos, propio de la reproducción sexual). Por tanto, si no hay mutación, los descendientes de una hembra asexual presentan un genoma idéntico al materno, es decir, son un clon natural de la madre. Así, en un ambiente estable, un organismo asexual bien adaptado producirá descendientes igual de bien adaptados que él, lo que constituye una ventaja evolutiva. Además, los organismos asexuales no necesitan buscar una pareja para reproducirse, con lo que ahorran tiempo y energía y evitan los riesgos asociados al apareamiento (enfermedades de transmisión sexual, mayor exposición a los depredadores, etcétera).

Esas ventajas obvias llevarían a la idea errónea del predominio de la reproducción asexual en la naturaleza. Explicar tal discrepancia entre lo esperado y la realidad —«la paradoja del sexo»— ha representado uno de los principales retos de la biología evolutiva desde hace un siglo. Se han propuesto numerosas teorías que todavía esperan ser validadas. En general, se acepta que la sexualidad ofrece beneficios a largo plazo, a saber, la eliminación de mutaciones y la generación de variación genética para la adaptación ecológica. Sin embargo, las ventajas a corto plazo de la asexualidad la llevarían a dominar en una población y entonces los beneficios a largo plazo de la sexualidad nunca llegarían. Por tanto, resulta de especial interés descubrir los beneficios a corto plazo de la reproducción sexual.

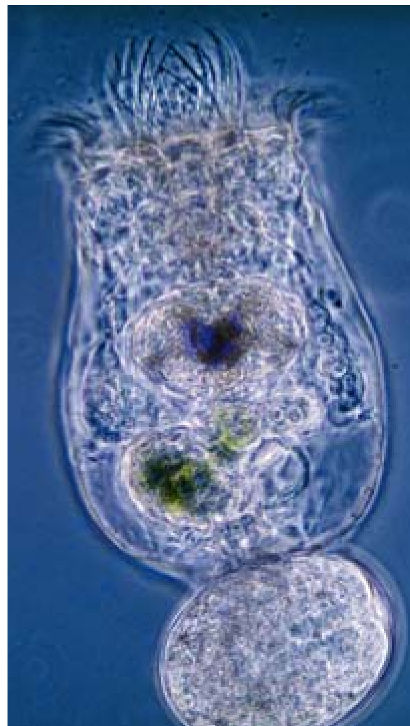


Imagen al microscopio óptico de una **hembra del rotífero *Brachionus plicatilis*, un pequeño animal del plancton. Estos rotíferos se reproducen tanto sexual como asexualmente, por lo que constituyen modelos para el estudio de la evolución de la sexualidad.**

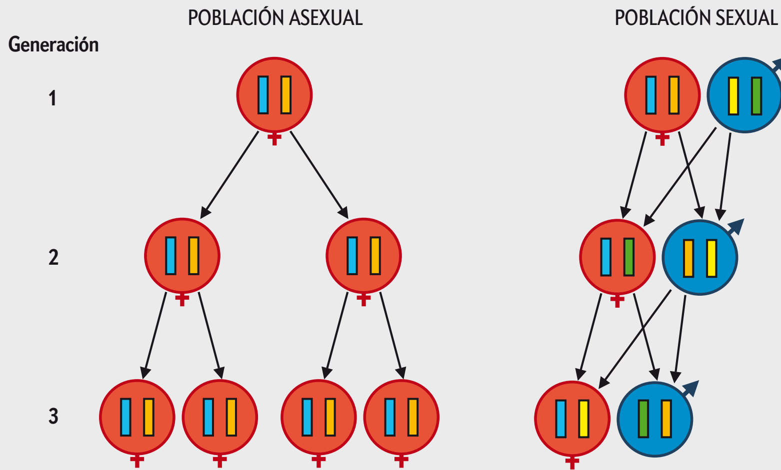
MANUEL SERRA

Reproducción mixta

Si aún no existe una explicación satisfactoria y general de las ventajas de la sexualidad frente a la asexualidad, ¿cómo explicar, además, que la mayoría de las especies utilizan la primera como única forma de reproducción cuando existen organismos con ambas estrategias? Esta realidad plantea nuevos interrogantes al intentar aclarar la paradoja del sexo. Por una parte, estos organismos aprovechan las ventajas de ambos tipos de reproducción, lo que parecería óptimo. Pero por

EL DOBLE COSTE DEL SEXO

Consideremos dos poblaciones, una con reproducción asexual y otra con reproducción sexual, y supongamos que en ellas las hembras dan lugar solo a dos descendientes. En el primer caso, la población se duplicará en cada generación, ya que cada miembro de la población producirá dos descendientes. En el segundo caso, la población permanecerá constante, puesto que la mitad de la descendencia serán machos (una relación 1:1 entre sexos es la situación habitual en las poblaciones), y ellos sólo contribuyen a la siguiente generación mediante la fecundación de las hembras. La población (clónica) descendiente de la hembra con reproducción asexual se multiplica con una tasa doble que la de la hembra con reproducción sexual.



otra, habría una propensión a perder la sexualidad como consecuencia del doble coste del sexo. La transición a la asexualidad en estos organismos con reproducción mixta sería mucho más sencilla que en un organismo que se reprodujera sólo sexualmente, pues no exigiría la adquisición de una forma de reproducción alternativa; sólo implicaría la pérdida de una de las dos estrategias reproductivas (la sexual).

Por ello, los organismos con reproducción mixta son particularmente adecuados para estudiar los factores ecológicos y evolutivos responsables del mantenimiento de la reproducción sexual, y son foco de atención en estudios recientes. Es el caso de los rotíferos monogonontes, invertebrados microscópicos que habitan una gran variedad de ambientes acuáticos. En ellos la sexualidad ofrece una gran ventaja a corto plazo. Gracias a ella producen huevos diapáusicos, que resisten las condiciones adversas como la desecación y se mantienen viables durante decenios en el sedimento. En latitudes templadas las poblaciones de rotíferos son temporales, es decir, sólo están activas durante una fracción del año. El período de crecimiento planctónico se inicia cuando, tras la eclosión de los huevos diapáusicos presentes en el sedimento, las hembras emergentes colonizan la columna de agua. Estas se reproducen asexualmente y proliferan en poco tiempo generando clones de hijas genéticamente idénticas a ellas. Este período de reproducción exclusivamente asexual viene seguido por otro —que se inicia en respuesta a factores ambientales— con ambos tipos de reproducción.

Sin embargo, en estudios de laboratorio se ha observado que no todos los clones de rotíferos poseen la misma propensión genética (heredable) a reproducirse sexualmente. Ello establece diferencias en la proliferación de los clones: los que presentan una mayor tendencia a la reproducción sexual verán frenado su crecimiento con respecto a los demás, que disfrutarán de la multiplicación más rápida que proporciona la reproducción asexual y tenderán a dominar en la población. Pero al final del período de crecimiento —cuando la competencia es elevada, los recursos escasean o el lago se deseca— sólo los clones que se hayan reproducido sexualmente y hayan formado huevos diapáusicos lograrán permanecer latentes en el sedimento y proliferar de nuevo cuando retornen las condiciones favorables. Los clones más propensos a la reproducción sexual, que dieron lugar a un mayor número de huevos, demuestran en esta fase su superioridad.

Partiendo de esta argumentación, un grupo de investigadores de la Universidad de Valencia contrastó, en un estudio publicado en octubre de 2009 en *Journal of Evolutionary Biology*, la hipótesis de que durante el período de crecimiento planctónico de una población de rotíferos se produciría una importante selección a favor de la reproducción asexual. N. Dimas, E. M. García-Roger, M. Serra y la autora analizaron la variación en la propensión a la reproducción sexual en una población del rotífero *Brachionus plicatilis* en una laguna temporal del parque natural Prat de Cabanes-Torreblanca (Castellón). Para ello, aislaron periódicamente hembras de este rotífero durante el periodo de crecimiento de la población. A partir de ellas establecieron clones por reproducción asexual y analizaron su tendencia a reproducirse sexualmente. Los clones mostraron una gran variación genética en cuanto a esa tendencia, lo que significa que la selección natural tiene la oportunidad de actuar sobre ese rasgo. Además, durante el período de crecimiento planctónico aumentó la frecuencia de clones con menos reproducción sexual.

Este es el primer dato en una población natural que apoya la hipótesis de una selección a corto plazo a favor de la reproducción asexual en rotíferos. Los resultados demuestran las ventajas de la asexualidad, o dicho a la inversa, el coste del sexo. También indican que la coexistencia de ambos tipos de reproducción es inestable, lo que con frecuencia ocasionaría una transición hacia la reproducción asexual exclusiva. Sin embargo, como otras poblaciones de rotíferos, la de *B. plicatilis* es temporal y cada año desaparece de la laguna, que puede llegar a secarse. La necesidad de la sexualidad para producir huevos latentes, que permiten sobrevivir hasta el siguiente año, actuará en oposición a la selección a favor de la asexualidad en el período de crecimiento.

En conclusión, la supervivencia en condiciones adversas determina el mantenimiento de la sexualidad y la coexistencia de ambos tipos de reproducción en los rotíferos, independientemente de otras ventajas que la reproducción sexual puede ofrecer.

—María José Carmona
Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva
Universidad de Valencia



EVOLUCIÓN

Origen de la copulación

El hallazgo de ciertos peces fósiles hace retroceder en el tiempo el origen de la cópula en los vertebrados

John A. Long

OWEN GILDERSLEEVE



John A. Long estudia las primeras fases de la evolución de los peces. En la actualidad es vicepresidente de investigación y colecciones del Museo de Historia Natural del condado de Los Angeles. Hace poco se trasladó a Estados Unidos desde Australia, donde era director científico del Museo Victoria de Melbourne.

Un caluroso día de agosto de 2005, nuestro equipo se hallaba buscando fósiles en Gogo Station, un extenso rancho ganadero situado en el noroeste de Australia. Hoy en día esta región árida no es apta para la vida de animales acuáticos. Pero hace unos 375 millones de años, durante el Devónico tardío, un mar somero cubría la región. Gogo era la sede de un enorme arrecife tropical que bullía de seres marinos, entre ellos una plétora de peces primitivos. Por suerte, muchos de sus restos han sobrevivido a lo largo de los eones. Entre los grupos de arbustos punzantes de *Spinifex* y las adormiladas víboras espinosas se esconden nódulos de caliza del tamaño de pelotas de béisbol (el producto de millones de años de erosión de los esquistos locales), algunos de los cuales albergan fósiles prístinos de los peces que vivieron en el arrecife primigenio. Durante nuestra expedición, pasamos los días cascando y abriendo los nódulos, uno tras otro, con la esperanza de hallar un tesoro en su interior.

Los peces más abundantes que merodeaban por el arrecife de Gogo eran los Placodermos («de piel de placas»), unos de los primeros animales vertebrados que poseían mandíbulas. Hoy extinguidos, los Placodermos dominaron los mares del mundo durante 70 millones de años y representaron el grupo de vertebrados de mayor éxito en su época. Desde hace tiempo se ha debatido sobre su relación con otros vertebrados, lo que motivó nuestra búsqueda en Gogo de especímenes que ayudaran a resolver esta y otras cuestiones relativas a la evolución de los peces. Aquel día, nuestros esfuerzos se vieron recompensados con un nódulo que contenía lo que parecía un pez bastante completo. Pero su anatomía no me atrajo en especial la atención. Poco podía imaginar que ese hallazgo aparentemente modesto iba a cambiar por completo el conocimiento de un aspecto muy íntimo de la biología de los vertebrados: el origen de la cópula sexual y de la fecundación interna.

Tradicionalmente se pensaba que la fecundación interna y el desarrollo de las crías dentro del cuerpo materno constituían una forma especializada de reproducción que apareció en los tiburones y otros peces afines (que forman el grupo de los Condrictios) hace unos 350 millones de años, unos 70 millones de años después de que surgieran por evolución los primeros miembros de dicho grupo. Antes de esa fecha, se suponía que la procreación de los peces estaba limitada a la freza o desove, un asunto claramente impersonal en el que las hembras depositan los huevos en el agua, los machos a continuación los fecundan y los embriones se desarrollan en el medio externo. Pero análisis recientes de los peces que descubrimos en 2005, junto con otros placodermos de Gogo y de otros lugares, han revelado que la copulación y el nacimiento de crías vivas ya existían millones de años antes en un grupo de vertebrados más primitivo que los Condrictios.

Los Placodermos forman parte del extenso linaje que dio lugar a los animales de cuatro patas (los tetrápodos, entre ellos los humanos). En el aparato sexual de los antiguos placodermos podemos ver los rudimentos más antiguos de nuestro propio sistema reproductor y de otras partes de nuestro cuerpo, y con ello conocer mejor la evolución de nuestra anatomía hasta el día de hoy. Las aletas pélvicas pares que permitían a los placodermos macho depositar el esperma en las hembras, con el tiempo, dieron origen a los genitales y patas posteriores de los tetrápodos. Las mandíbulas habrían surgido inicialmente para ayudar a los peces macho a sujetar a las hembras durante el apareamiento; solo después habrían adquirido la función de procesamiento del alimento. El sexo, según parece, lo cambió todo.



Cordón umbilical fosilizado perteneciente a un embrión que se halló dentro del pez primitivo *Materpiscis*, el ejemplo más antiguo de un animal que presentaba fecundación interna y paría crías vivas.

EL FILÓN PRINCIPAL

Los fósiles de Gogo son famosos por su extraordinaria conservación. A diferencia de la mayoría de los peces fósiles, que se hallan aplastados, los de Gogo suelen conservar la estructura tridimensional original. Sin embargo, la extracción completa de los esqueletos exige mucho tiempo: hay que disolver cuidadosamente la matriz calcárea, aplicando vinagre diluido (ácido acético), con el fin de no alterar el hueso fosilizado. No fue hasta noviembre de 2007 cuando tuve la oportunidad de limpiar el espécimen descubierto por mi equipo dos años antes. El animal fosilizado, del tamaño de una caballa, presentaba mandíbulas robustas y dientes formados para triturar, observación que nos permitió determinar, junto con Kate Trinajstic, en la actualidad en la Universidad de Curtin, su pertenencia a la familia de los placodermos Ptictodóntidos. El hallazgo por sí solo ya resultaba alentador, porque los Ptictodón-

EN SÍNTESIS

Los científicos creían que, en los animales vertebrados, la fecundación interna surgió hace 350 millones de años en el grupo de los tiburones y sus afines.

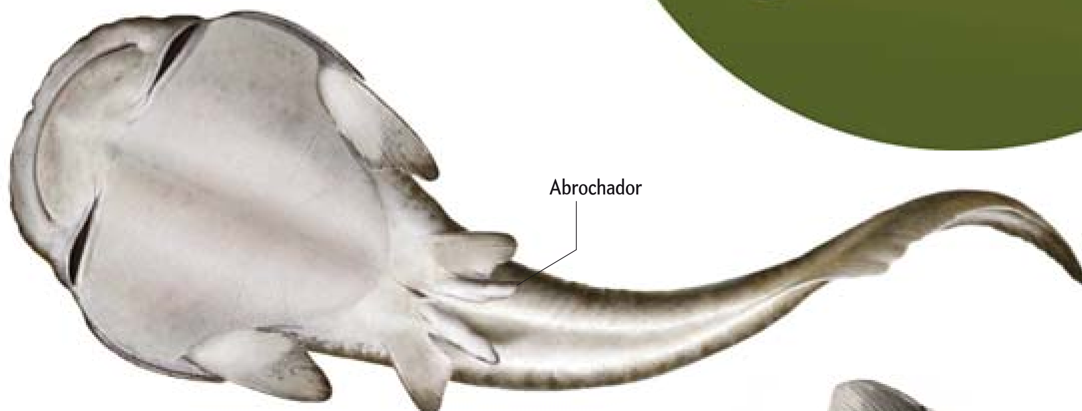
Pero nuevos hallazgos fósiles indican que la cópula (y la gestación de crías en el cuerpo materno hasta el momento del parto) hizo su aparición millones de años antes y en un grupo de peces más primitivos.

Tales descubrimientos arrojan nueva luz sobre el origen de los órganos reproductores humanos y otras partes de nuestro cuerpo.

El origen de la cópula

Los Placodermos, peces extinguidos que vivieron hace unos 375 millones de años, durante el Devónico tardío, fueron los primeros vertebrados que copulaban y parían crías vivas, en vez de poner huevos en el agua para su posterior fecundación y desarrollo. Aunque los animales que procrean de esta manera dan lugar a muchos menos descendientes que los que frezan, las crías son mayores y más resistentes que las procedentes del desove. Esta estrategia reproductiva habría conferido una ventaja clave para la supervivencia en el Devónico, cuando los mares se hallaban repletos de depredadores.





Algunos fósiles del placodermo australiano *Austrophyllolepis* demuestran que los machos poseían abrochadores, unos apéndices carnosos de la cintura pélvica que insertaban en la hembra, uno cada vez, para transferir esperma.



Se descubrió que ciertos fósiles de placodermos, como *Materpiscis* contenían embriones, prueba de que esos peces parían crías vivas, en lugar de poner huevos como sus predecesores.

PETER TRUSLER (*inserto y Austrophyllolepis*), JEN CHRISTIANSEN (*Materpiscis*)

tidos son un grupo poco conocido, y nuestro ejemplar parecía corresponder a una nueva especie. Pero el descubrimiento iba a revelarse mucho más interesante.

Al proseguir con la eliminación de la caliza, advertí algunas estructuras insólitas cerca de la base de la cola del animal. En un examen más detallado bajo el microscopio identifiqué un conjunto de mandíbulas pequeñas y delicadas junto a otros huesecillos dispersos. Experimenté entonces uno de esos momentos sublimes y únicos en la vida de un científico. Normalmente hubiera supuesto que los restos representarían la última comida del pez. Pero las mandíbulas diminutas poseían los mismos rasgos distintivos que las del animal de mayor tamaño, no estaban dañadas y todavía se hallaban parcialmente articuladas; todo indicaba que los minúsculos huesos pertenecían a un embrión en desarrollo y no a los restos de una pitanza. Además, observé una estructura retorcida arrollada alrededor del pequeño esqueleto. Mediante un microscopio electrónico de barrido, pronto dedujimos que se trataba de un cordón umbilical fosilizado que habría suministrado al embrión los nutrientes de un saco vitelino. No cabía la menor duda: habíamos descubierto una hembra de pez gestante de 375 millones de años de antigüedad y el embrión más primitivo conocido de vertebrado. Denominamos a la nueva especie *Materpiscis attenboroughi*, es decir, «pez madre de Attenborough», en honor al gran divulgador de la naturaleza David Attenborough.

El descubrimiento de *Materpiscis* permitió resolver un antiguo enigma acerca de los Ptictodóntidos. En los años treinta del siglo xx, el anatomista D. M. S. Watson observó que los machos de una especie de ptictodóntido fósil de Escocia poseían largos apéndices cartilaginosos que surgían de la cintura ósea que sostenía las aletas pélvicas del animal. En vida, dichos apéndices habrían estado revestidos de carne y piel y formarían estructuras semejantes a los dos abrochadores o pterigópodos de los machos de los condrictios actuales. Estos insertan uno u otro pterigópodo en la hembra para transferir el esperma durante la cópula. Pero los abrochadores del ptictodóntido escocés estaban recubiertos de placas óseas, que los habrían hecho rígidos y poco eficaces. Además, aunque todos los pterigópodos de condrictios están rematados con ganchos escamiformes que ayudan a mantener los abrochadores en su lugar durante el apa-

reamiento, los de aquel ptictodóntido eran tan pronunciados que más bien habrían servido de elemento disuasorio, en lugar de facilitar la cópula.

En posteriores descubrimientos de ptictodóntidos se identificaron los mismos rasgos, lo que mantuvo el interrogante de si esos peces insertaban sus extraños abrochadores en la hembra o si los utilizaban para agarrar a esta durante la copulación; o aun si solo les servían de adornos puntiagudos para atraer a una pareja. Llegados a este punto, y sobre la base del registro fósil, los paleontólogos no podían afirmar de manera definitiva si los Ptictodóntidos se apareaban mediante cópula o si frezaban. Nuestra hembra de pez y su cría hacían pensar que al menos algunos ptictodóntidos se reproducían mediante fecundación interna y parían crías vivas.

La revelación de *Materpiscis* nos animó a volver a examinar otros fósiles de ptictodóntidos descubiertos en Gogo para ver si, también ellos, contenían crías. Esta búsqueda nos condujo a un espécimen de un género de ptictodóntido distinto, *Austroptyctodus*, que yo había preparado veinte años antes. Tras una observación detenida en el microscopio a un mayor aumento, y sobre la base del primer descubrimiento de embrión, deduje que los rasgos que inicialmente había interpretado como escamas sueltas correspondían en realidad a huesos diminutos de embriones. Habíamos identificado otra madre antigua que había fallecido con trillizos en su interior.

Después de nuestros hallazgos sobre hembras gestantes de ptictodóntidos, que nuestro equipo publicó en *Nature* en 2008, empezamos a examinar más placodermos de Gogo. Nuestros estudios habían determinado que los Ptictodóntidos copulaban y parían crías vivas, pero estos constituían solo uno de los siete grupos de Placodermos. ¿Cuán extendido estaba ese nuevo modo de reproducción? Centramos nuestra atención en un espécimen de placodermo del género *Incisoscutum*, en el que se había descrito un «contenido estomacal» formado por huesos de un pez de menor tamaño. Tanto este fósil como otro del mismo género resultaron llevar embriones.

Incisoscutum pertenece al mayor de los grupos de placodermos, los Artrodiros. El grupo está constituido por más de 300 especies, entre ellas los mayores placodermos que jamás han existido, como el temible *Dunkleosteus*, de seis metros de longitud. Antes de nuestro descubrimiento, no había pruebas de que los machos y hembras de artrodiros difirieran en su anatomía externa, ni tampoco ningún indicio de que copularan. Pero los embriones que habíamos hallado indicaban claramente que *Incisoscutum* se reproducía mediante fecundación interna. Finalmente, a partir de ejemplares de Gogo y de otras localidades, demostramos que los machos de artrodiros también poseían pterigópodos que facilitaban el apareamiento, resultados que publicamos en otros dos artículos en *Nature* en 2009. Así, al menos dos de los siete grupos principales de Placodermos, entre ellos el de mayor éxito, se reproducían mediante cópula al menos 25 millones de años antes de que lo hicieran los tiburones y otros condrictios.

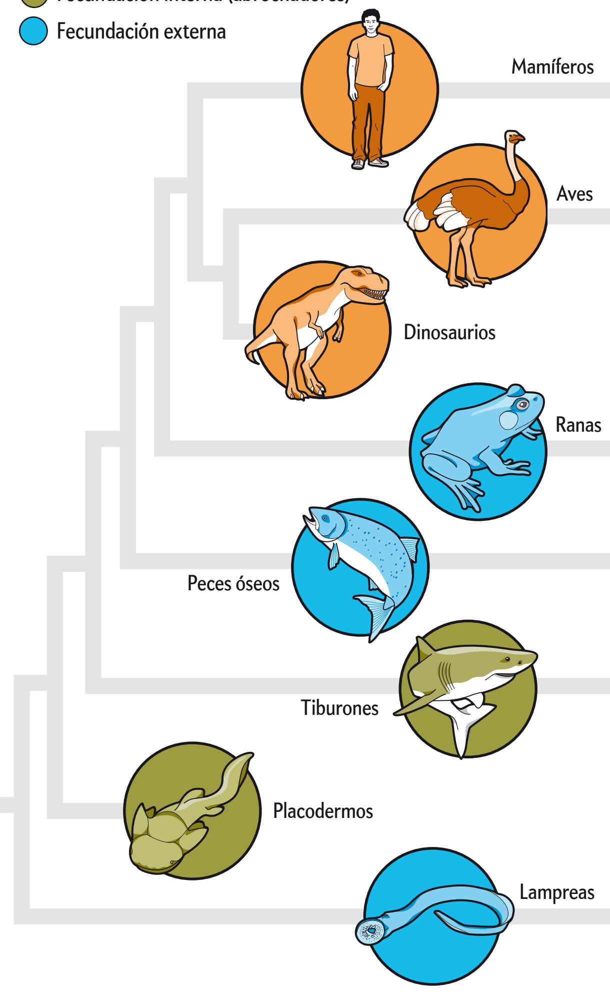
REVOLUCIÓN SEXUAL

A la luz de estos hallazgos, parece hoy evidente que la reproducción sexual interna tuvo su origen en los Placodermos. También conocemos mejor su ubicación en el árbol filogenético de los vertebrados. La antigua idea imperante sostenía que los Placodermos habían dado lugar a solo uno de los dos grupos actuales de vertebrados con mandíbulas, a saber, los tiburones y sus parientes condrictios. Pero los nuevos descubrimientos, junto con los análisis de las relaciones evolutivas entre los primeros vertebrados realizados en 2009 por Martin Brazeau, en la actualidad en el Museo de Historia Natural de Berlín, hacen pensar que los Placodermos representarían los ancestros de los Condrictios primitivos y de un grupo de peces extinguidos, los Acantodios. Se cree que algunos de dichos acantodios son los

CONTEXTO EVOLUTIVO

Lazos familiares

Los Placodermos forman parte del linaje que dio origen a los animales de cuatro patas (los tetrápodos, entre ellos los humanos). Aunque la fecundación interna surgió en los Placodermos, la mayoría de los peces óseos que les sucedieron retornaron a la freza. Sin embargo, con la evolución de los tetrápodos a partir de los peces óseos, la fecundación interna reapareció. La anatomía pélvica heredada de los Placodermos (incluidos los abrochadores que usaban para la cópula) proporcionó la base para la formación de la cadera, las patas y los genitales de los tetrápodos. En lugar de abrochadores, los tetrápodos desarrollaron órganos reproductores bilobados denominados hemipenes, así como penes. El esquema inferior muestra la forma predominante de reproducción en los principales grupos de vertebrados.



BROWN BIRD DESIGN

antepasados de los primeros peces óseos, el linaje que originó los tetrápodos (entre ellos, los humanos).

Sin embargo, esta nueva idea sobre el inicio del sexo planteaba importantes cuestiones. Nuestro grupo empezó a analizar cómo la adquisición de la cópula como estrategia reproductiva había influido en la evolución posterior de los vertebrados. Las comparaciones anatómicas realizadas por nuestro equipo y otros ya habían hecho suponer que las patas posteriores y los genitales de los tetrápodos se habían desarrollado a partir de la cintura pélvica (que incluía los abrochadores) de los peces primitivos. Una de las pruebas más convincentes que apoyaba esa hipótesis procedía de los estudios de Martin J. Cohn, de la Universidad de Florida. En 2004, Cohn demostró que el gen *Hoxd13*, implicado en el desarrollo de las aletas pectorales y pélvicas de los peces mandibulados actuales, intervenía también en la formación de las extremidades y genitales de los mamíferos.

Si según el nuevo trabajo descendíamos de los Placodermos, los rasgos mencionados debían proceder asimismo de dichos peces. Pero nos preguntábamos qué otros legados anatómicos habíamos heredado de los Placodermos. Entre los tiburones actuales, los machos cortejan a las hembras antes de aparearse con ellas. En algunas especies, como el tiburón coralero ñato (*Triaenodon obesus*), el macho inicia el preludio amoroso mordiendo el dorso y el cuello de la hembra, y a continuación su aleta pectoral, un movimiento que después le ayuda a sujetarla mientras copula. Esta observación nos llevó a especular que quizá las mandíbulas no se habían desarrollado para procesar el alimento, como tradicionalmente se pensaba, sino para aumentar el éxito del apareamiento. Una tal innovación habría allanado el camino para que más tarde las mandíbulas adquirieran la función de masticación. Aunque la mayoría de los peces óseos volvieron a la freza, y por lo tanto no utilizaron sus mandíbulas para aparearse, ya estaban preadaptados a la masticación gracias a sus antepasados placodermos. (Posteriormente, sobre la base de las aletas pélvicas establecida por los Placodermos, la fecundación interna reapareció en los animales terrestres, un cambio evolutivo que les liberó de la necesidad de retornar al agua para reproducirse.) Saber que la fecundación interna había surgido antes en los Placodermos que en los tiburones, y que los Placodermos eran antepasados de los peces óseos, nos ayudó a establecer esta posible conexión entre la cópula y la masticación en el linaje animal que dio origen a los humanos.

Al considerar un marco evolutivo más amplio, nuestro equipo advirtió que la nueva fecha del origen de la copulación se correspondía con la enorme diversificación de los peces Artrodiros, la primera gran radiación de los mandibulados en el registro fósil. ¿Acaso este primer cambio en la biología reproductiva de los vertebrados, desde la freza hasta la fecundación interna, representó el principal impulsor de ese gran acontecimiento evolutivo? Nuestra búsqueda en la bibliografía dio como resultado algunas pistas interesantes. En 2004, el equipo de Shane Webb, de la Universidad de St. Andrews en Escocia, publicó que los Gudeidos, un grupo de peces que en la actualidad viven en ríos de Nevada y del oeste y centro de México, se dividieron en dos estirpes hace unos 16,8 millones de años. Una de ellas continuó frezando en el agua y se diversificó en solo 4 especies. La otra desarrolló una forma de fecundación interna y en la actualidad comprende 36 especies. Los Bititoideos, otro grupo de peces que incluye tres linajes, muestran un patrón similar. El que adquirió fecundación interna consta de 107 especies. De los otros dos linajes, que mantuvieron la estrategia de la freza, uno contiene 22 especies y el otro solo 3. El hecho de que, en ambos grupos, los linajes con fecundación interna experimentaran una diversificación de especies muy superior a la de los linajes con desove tal vez nos acerca a la verificación de nuestra hipótesis.

A primera vista, la hipótesis de que la fecundación interna desencadenó la radiación de los Artrodiros puede parecer contraintuitiva. En teoría, el desove, con la puesta de decenas de miles de huevos, debería originar muchos más descendientes que la fecundación interna y la gestación, en que la madre invierte mucha energía en el desarrollo de unas pocas crías cada vez. Y cuanto mayor sea el número de descendientes, mayores serán las probabilidades de que alguno de ellos herede una mezcla de genes que favorezca la aparición de una nueva especie. Pero, durante el Devónico, la mayoría de los peces se alimentaban de otros peces, y los diminutos y débiles alevines resultantes de la freza constituirían una presa fácil. Una estrategia reproductiva en que la madre tuviera que alimentar a un menor número de descendientes con un tamaño corporal mayor (lo que aumentaría la supervivencia de los alevines que alcanzaran la edad de procreación) sin duda habría conferido a los Artrodiros una ventaja evolutiva.

PREPARARSE PARA EL ACTO

Quedan por resolver todavía muchas preguntas acerca del origen y la evolución de la fecundación interna en los vertebrados. No se conoce con exactitud la transición desde el desove hasta la fecundación interna en los Placodermos. Al carecer de la posibilidad de observarlos en acción, solo cabe especular sobre la naturaleza de ese cambio en el mar. Desde un punto de vista mecánico, todo pudo haber empezado con la aproximación paulatina de machos y hembras para aumentar el éxito de la fecundación o la protección de los huevos fecundados en la freza. Tal vez existiera un estadio intermedio en el que la hembra o el macho llevaran consigo la masa de huevos, como hacen algunos peces —entre ellos los caballitos de mar, que incuban la puesta en bolsas—. Quizás el uso de aletas pélvicas adaptadas para transferir con mayor eficacia el esperma a la masa de huevos hizo que el macho se acercara más a la hembra, y esta disposición favoreció, por selección natural, el desarrollo de lóbulos de aletas más grandes y alargados, que acabaron convirtiéndose en abrochadores.

Debieron existir factores neurológicos que motivaron a los machos a insertar partes de sus aletas pélvicas en las hembras para aparearse. Quizás ese deseo surgió como un subproducto de la selección natural, que favorecería la fecundación de los huevos antes de que la hembra los hubiera puesto y aumentarían así las probabilidades de ganar la mano a otros machos. Ulteriores estudios de las señales químicas y los desencadenantes neurales que rigen el comportamiento de la cópula en los tiburones y otros peces pueden proporcionar pistas adicionales sobre el primer paso evolutivo que dio lugar al coito.

PARA SABER MÁS

Developmental genetics of the external genitalia. Martin J. Cohn en *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 545, págs. 149-157, 31 de marzo de 2004.

Swimming in stone. John A. Long. Fremantle Press, 2006.

Live birth in the Devonian period. John A. Long, Kate Trinajstic, Gavin C. Young y Tim Senden en *Nature*, vol. 453, págs. 650-652, 29 de mayo de 2008.

Devonian arthrodire embryos and the origin of internal fertilization in vertebrates. John A. Long, Kate Trinajstic y Zerina Johanson en *Nature*, vol. 457, págs. 1124-1127, 26 de febrero de 2009.

Pelvic claspers confirm chondrichthyan-like internal fertilization in arthrodires. Per Ahlberg, Kate Trinajstic, Zerina Johanson y John A. Long en *Nature*, vol. 460, págs. 888-889, 13 de agosto de 2009.

The Rise of Fishes. John A. Long, Johns Hopkins University Press, segunda edición, 2010.




CARLA GOTTGENS, GETTY IMAGES

SALUD PÚBLICA

fÁBRICAS DE GRIPE

El siguiente virus pandémico podría estar circulando por las granjas porcinas de EE.UU., pero la vigilancia de esa amenaza resulta deficiente

Helen Branswell

Helen Branswell es periodista especializada en temas médicos de la prensa canadiense; ha cubierto el tema de la gripe durante los últimos siete años. En la actualidad disfruta de la beca Nieman de la Universidad de Harvard sobre periodismo en salud global.



La gripe pandémica de 2009 pareció surgir de la nada. Comenzó con lo que parecía un brote letal en México; luego, se propagó hacia el norte de la frontera. Para cuando las autoridades se dieron cuenta de la alarmante expansión del virus y de la amenaza que suponía para la humanidad, ya no había forma de evitar su propagación por todo el mundo. Gracias a un golpe de suerte, los síntomas fueron leves en la gran mayoría de los casos. ¿Y si la próxima vez no tuviésemos tanta suerte? [*véase* «Nueva gripe humana de origen porcino», por Esteban Domingo; Investigación y Ciencia, junio de 2009].

Los investigadores de la gripe y las autoridades sanitarias centran sus esfuerzos en esa cuestión para hacer frente al siguiente gran brote que sin duda aparecerá. Los virus de la gripe mutan constantemente. De vez en cuando, esos cambios dan lugar a virus muy distintos de los que suelen reconocer nuestros sistemas inmunitarios y entonces se desencadena una pandemia. Algún día se descubrirá una vacuna que permitirá combatir todos los subtipos de gripe, pero ese momento queda todavía lejos. Puesto que aparecerán nuevos virus de aves, cerdos u otros animales, la mejor opción consiste en detectarlos con la suficiente antelación para fabricar a tiempo las vacunas dirigidas contra ellos y acortar el período que transcurre entre las primeras infecciones y las inmunizaciones masivas. Debe evitarse lo sucedido en 2009, cuando la vacuna llegó justo en el momento en que el brote estaba alcanzando su máxima intensidad y el interés público estaba decayendo.

Pero la detección de nuevas amenazas solo es posible si los científicos conocen los tipos de virus que están circulando entre las especies con mayor probabilidad de ocasionar nuevos virus pandémicos: aves y cerdos. Y mientras la vigilancia de las primeras ha mejorado durante los últimos cinco o seis años gracias a la preocupación que surgió a raíz de la gripe aviar (el virus H5N1), se sabe muy poco sobre los virus que infectan a los 941 millones de cerdos domesticados en todo el mundo.

Sin embargo, el seguimiento intensivo de los virus porcinos difícilmente se convertirá en una realidad a corto plazo. En la mayoría de los países productores de ganado porcino no se realizan pruebas a los cerdos y, en algunos donde sí se hacen —como Estados Unidos—, los análisis son sufragados por los propios ganaderos, que carecen de incentivos económicos para compartir sus descubrimientos. Ello se debe a que los propietarios de las granjas saben que los precios del ganado porcino se desploman cuando en las noticias aparecen relacionados cerdos y gripe. En EE.UU., las agencias gubernamentales han diseñado un nuevo programa con el que esperan obtener esos datos tan necesarios sin amenazar el sustento de los productores. Pero muchos expertos en salud temen que los compromisos establecidos para conseguir involucrar a los propietarios de las granjas porcinas hagan tambalear la iniciativa.

TASAS DE MUTACIÓN CRECIENTES

Los cerdos representan el talón de Aquiles de los sistemas de vigilancia mundial de la gripe. Para los animales y las personas que se encargan de criarlos, la gripe supone más un incordio que una grave amenaza; normalmente solo provoca síntomas leves en los cerdos. La gripe porcina ni siquiera es una enfermedad de notificación obligatoria, una categoría que se reserva para aquellas enfermedades que constituyen una amenaza para toda la industria, como la glosopeda. Por otro lado, los virus de la gripe porcina pueden ocasionar afecciones graves en la población general. Los cerdos representan un crisol genético que favorece la aparición de nuevos virus. Los animales pueden infectarse a la vez con virus de la gripe de aves, otros cerdos o seres humanos, y ofrecen la posibilidad de que los genes se combinen entre sí y surjan variedades recombinantes nuevas. Existe el temor de que estos híbridos posean la capacidad de infectar con rapidez a las personas y, al mismo tiempo, sean lo bastante novedosos para provocar una enfermedad grave.

Desde el inicio de la pandemia de 2009, los científicos han tratado de identificar la manera y el lugar en que se originó el virus responsable. Aunque todavía quedan numerosos interrogantes por resolver, las conclusiones que se han extraído subrayan la necesidad de la vigilancia.

Durante decenios, los virus de la gripe que infectaban a los cerdos han permanecido muy estables. Eran descendientes genéticos del virus de la gripe A que provocó en 1918 la llamada gripe española, un brote que terminó con la vida de más de 50 millones de personas. Esta familia de virus se denomina H1N1; la H hace referencia a la hemaglutinina y la N a la neuraminidasa, dos proteínas localizadas en la superficie del patógeno que los laboratorios —y los sistemas inmunitarios— utilizan para distinguir un virus de la gripe de otro. (Hay 16 grupos de proteínas H y 9 grupos de proteínas N.) Los parientes lejanos de este virus han venido infectando gran parte del tiempo a la población desde la pandemia de 1918. Las variantes porcinas, o virus de la fiebre porcina clásica, evolucionaron con una mayor lentitud que las variedades humanas. Pero esa situación cambió de forma espectacular hace unos doce años. Por causas desconocidas, los virus de la gripe porcina empezaron a evolu-

EN SÍNTESIS

Amenaza emergente: Aunque la pandemia de gripe de 2009 resultó leve, no hay forma de saber si el próximo brote también lo será o se parecerá más a la enfermedad mortífera de 1918.

Alerta temprana: Tras el pánico provocado por la gripe aviar de 1997, los investigadores han desarrollado programas de vigilancia bastante eficaces para detectar posibles virus letales que pudiesen dar el salto desde las aves hasta las personas.

Desprevenidos: La pandemia de 2009 puso de relieve la posibilidad de que la amenaza principal procediera de los cerdos, no de las aves, ya que el salto de los virus porcinos hacia las personas normalmente resulta más fácil que el de los virus aviares.

Frustración: Los factores económicos dificultan la obtención regular de muestras víricas en las granjas porcinas, lo que desalienta a los funcionarios de salud, que desean prepararse mejor ante la próxima pandemia.

cionar a una velocidad vertiginosa en Norteamérica, donde se cría una ingente cantidad de cerdos.

De hecho, EE.UU. representa el segundo mayor productor de ganado porcino del mundo, después de China; en 2009, pasaron por los mataderos estadounidenses 115 millones de cerdos. Las granjas porcinas comerciales varían en tamaño y funcionamiento. Actualmente, en numerosas explotaciones se separan los animales en función de su fase de desarrollo; se mantienen apartadas a las hembras preñadas de los cochinillos para atajar la propagación de enfermedades que supongan una amenaza para el beneficio económico.

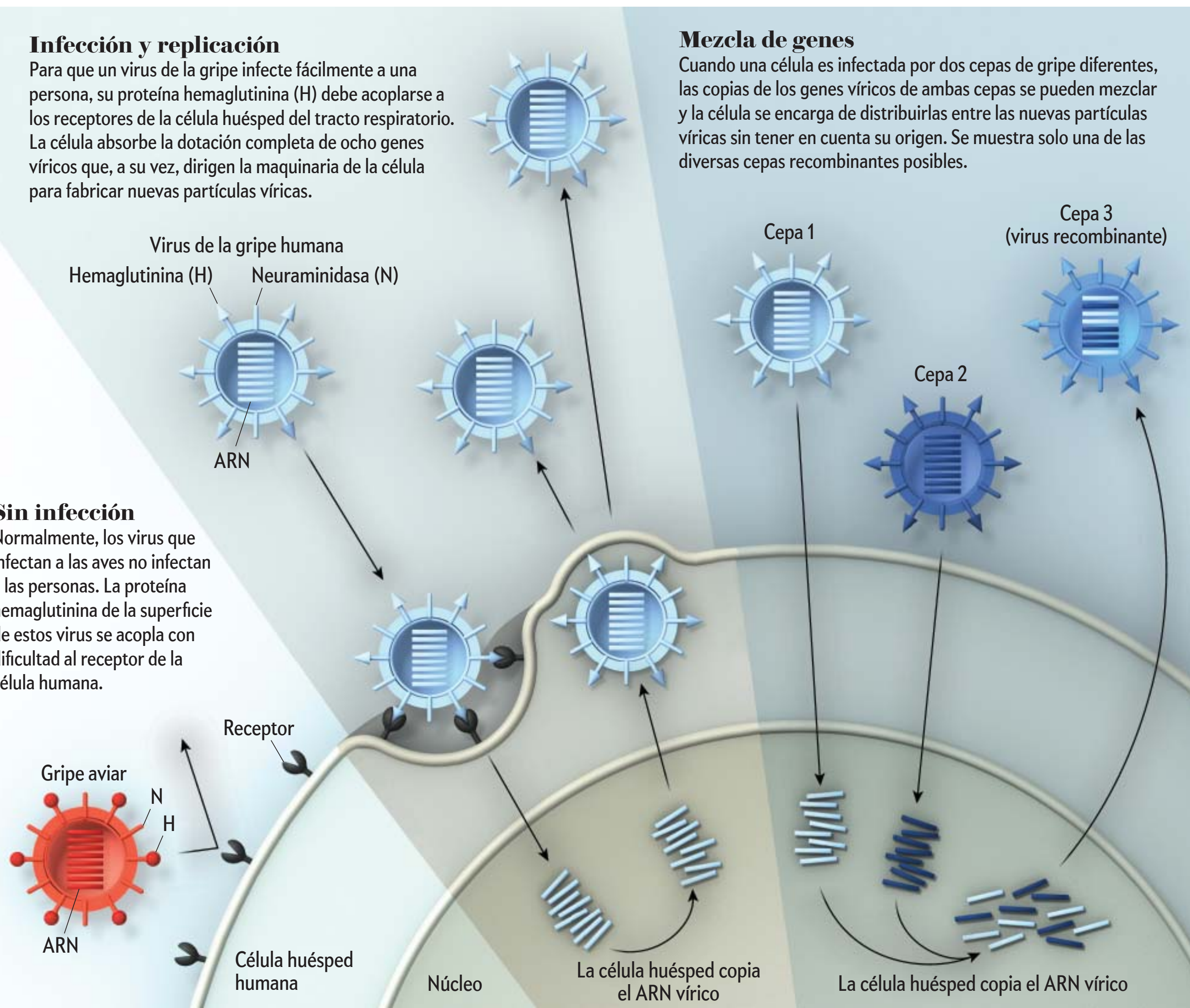
En 1998 se descubrió que algunas cabañas porcinas de Minnesota, Iowa y Texas estaban infectadas con un virus nuevo H3N2, un triple recombinante que contenía genes del virus de la gripe porcina clásica, así como de los virus que normalmente infectan a aves y de los que infectan a humanos. Desde entonces se han formado y propagado otros virus recombinantes triples. Entre ellos se incluyen una nueva versión de H1N1, y también de H1N2 y de H3N1. Además, en 2006 se identificó en Missouri un breve brote del virus del tipo H2N3, un giro peligroso, dado que las personas nacidas después de 1968 carecen de anticuerpos contra la familia H2. Los virus H2 se hallan entre los primeros de la lista de candidatos a provocar la siguiente pandemia.

Investigadores del Departamento de Agricultura de EE.UU. y de los laboratorios de diagnóstico publicaron artículos científicos sobre los nuevos virus. Pero el centro de atención de la mayoría de los investigadores y de los responsables sanitarios se desvió hacia una nueva grave amenaza: la gripe aviar. En 1997 apareció en el sudeste asiático un virus H5N1, considerado tradicionalmente como el epicentro de los nuevos virus de la gripe. El brote inicial, en Hong Kong, se contuvo después de que la ciudad ordenase el sacrificio de todas las aves de corral en su territorio. Sin embargo, hacia finales de 2003 el virus reapare-

REPLICACIÓN Y RECOMBINACIÓN

La baraja de los genes de la gripe

Los virus de la gripe están adaptados a una rápida evolución. Sin embargo, para multiplicarse necesitan infectar una célula. La figura inferior ilustra la introducción de los virus en las células humanas y los mecanismos que lo impiden. Cuando distintas cepas coinciden en una célula, sus genes se pueden recombinar y dar lugar a virus potencialmente peligrosos.

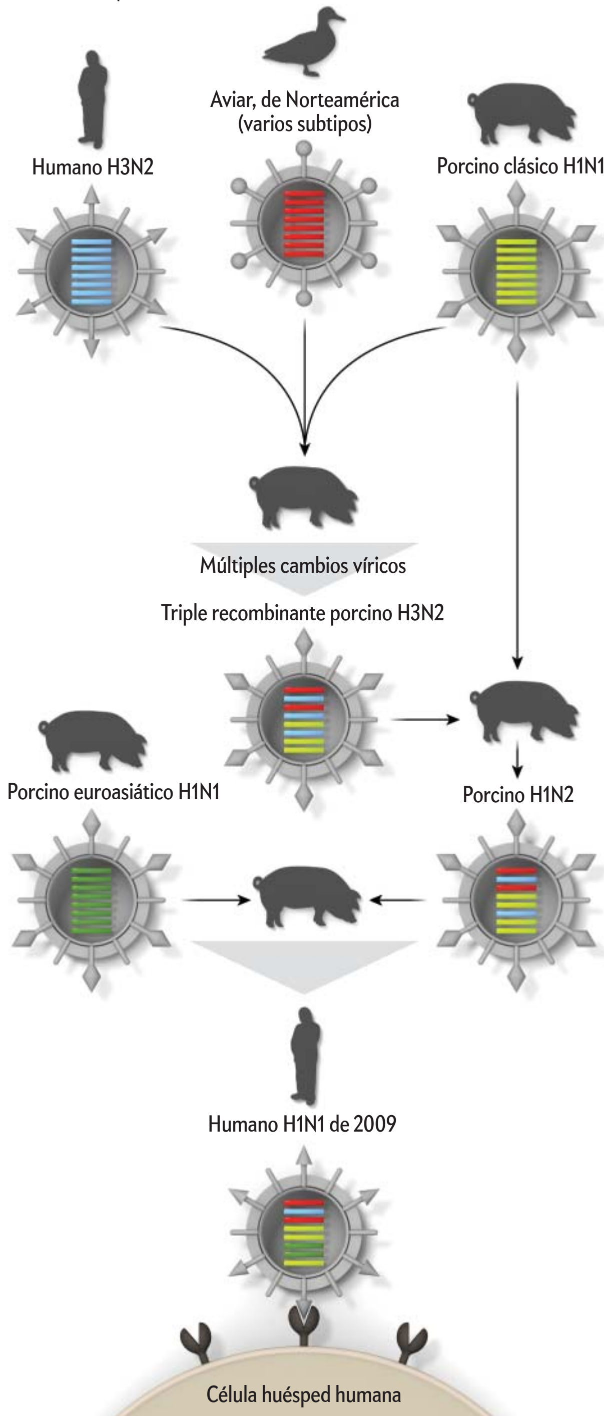


EMILY COOPER

VIROLOGÍA COMPLEJA

Creación de una gripe pandémica

El virus de la gripe pandémica de 2009 pertenece al grupo de los virus H1N1. La inmunidad hacia un virus H1N1 no protege contra otros del mismo grupo. La enorme alarma que provocó el virus H1N1 de 2009 se debió en parte a la capacidad de infección de sus antepasados en tres especies distintas: humanos, aves y cerdos. En otras palabras, el virus poseía material genético lo bastante novedoso para el sistema inmunitario humano como para provocar una pandemia, aunque esta resultase leve. Quizá no tengamos tanta suerte la próxima vez.



ció y arrasó las cabañas avícolas de China, Vietnam, Tailandia y, posteriormente, de otros países. Millones de aves murieron a causa de la infección o fueron sacrificadas para detener su propagación, y fallecieron más de 300 personas.

Esos episodios de gripe aviar subrayaron la necesidad de prevenir la aparición de nuevas cepas de gripe en los reservorios animales. El grupo de Malik Peiris y Guan Yi, de la Universidad de Hong Kong, ha llevado a cabo procedimientos innovadores para la vigilancia de aves en China. Durante más de un decenio el equipo ha introducido también un programa para detectar la gripe en los cerdos que llegan al matadero. Alrededor del 80 por ciento de los animales sacrificados en Hong Kong proceden de granjas cercanas ubicadas en la China continental. Aunque los datos recopilados en Hong Kong no son exhaustivos, el programa ofrece una panorámica sobre la evolución de la gripe porcina en esa vasta nación, una información más amplia de la que hoy se dispone, por ejemplo, de Estados Unidos.

DETECCIÓN DE VIRUS PORCINOS

La ironía de esa circunstancia no pasa desapercibida a los investigadores, que recuerdan la fuerte presión que ejerció EE.UU. sobre China, Indonesia y otros países asiáticos para que demostrasen mayor transparencia en lo referente a sus brotes de H5N1. Guan y otros están desalentados ante la escasez de datos relativos a la vigilancia de los cerdos. La información de EE.UU. resulta insuficiente, aunque tampoco se realiza ningún seguimiento de la gripe porcina en Sudamérica, América Central, África, India y otras regiones de Asia. «La situación actual es inquietante», declara Peiris. Conocemos la función que desempeñan los cerdos en la aparición de nuevos virus. «¿Por qué entonces no los supervisamos de cerca?»

En EE.UU. cabría otra pregunta más apropiada: «¿Por qué no se comparte la información?». Históricamente, los granjeros han analizado los cerdos para comprobar si padecían gripe, a menudo en los laboratorios de diagnóstico de la Red Nacional de Laboratorios para la Salud Animal (NAHLN). Los fabricantes de vacunas para cerdos necesitan conocer las gripes que amenazan a los animales con el fin de confeccionar las vacunas correspondientes. Pero la información recopilada por los sectores de salud animal apenas se comparte con los investigadores o los responsables de la salud pública. De hecho, tras el brote de 2009, los análisis para detectar la gripe en las granjas porcinas se pararon en seco. «Los productores no querían conocer la realidad y el flujo habitual de especímenes respiratorios enviados a los laboratorios de la NAHLN se detuvo», afirma Nancy J. Cox, directora de la división de la gripe de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) de EE.UU.

Las prioridades de esos laboratorios y compañías están orientadas a la mejora de los cerdos en provecho de sus propietarios. Los laboratorios de la NAHLN —a menudo ubicados en universidades, como la de Minnesota o la estatal de Iowa— trabajan para los granjeros, sus clientes. Cualquier descubrimiento, sea o no positivo, es confidencial, explica Montse Torremorell, catedrática de salud y productividad porcina en la Universidad de Minnesota. «Se realizan numerosas secuenciaciones destinadas a la vigilancia, lo admito, pero esa información se remite a las personas que han enviado las muestras».

Los descubrimientos dignos de mención, como el hallazgo del primer virus triple recombinante H3N2, se publican en las revistas científicas, pero el proceso puede tardar un año o más. Esa forma de divulgación no contribuye a la necesaria vigilancia en

FUENTE: «GEOGRAPHIC DEPENDENCE, SURVEILLANCE, AND ORIGINS OF THE 2009 INFLUENZA A (H1N1) VIRUS», POR VLADIMIR TRIFONOV ET AL. EN *NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE*, VOL. 361, N.º 2; 9 DE JULIO DE 2009

tiempo real; los responsables de la salud humana precisan una panorámica actual, no una perspectiva histórica de los acontecimientos. De cuando en cuando, alguien contrae la gripe porcina directamente de un cerdo y los CDC reciben una llamada. Pero, por lo general, este tipo de llamadas llegan demasiado tarde para poder llevar a cabo una investigación exhaustiva. «Con frecuencia, cuando logramos identificar el lugar de la exposición, los cerdos ya se han enviado al matadero», comenta Cox.

Los esfuerzos de otros investigadores para averiguar los distintos tipos de virus que circulan entre el ganado porcino también han debido hacer frente a ciertas reticencias. El equipo de Richard J. Webby, director del centro que colabora con la Organización Mundial de la Salud para el estudio de la gripe, en el Hospital St. Jude para la Investigación Infantil en Memphis, halló obstáculos en un estudio a corto plazo en el que pretendía obtener muestras de cerdos aparentemente sanos para detectar el virus de la gripe. Para poder acceder a los animales, el equipo de Webby prometió guardar todas las muestras recogidas en un congelador durante tres meses antes de estudiarlas. Se trataba de un gesto hacia los granjeros dispuestos a colaborar: se les aseguraba así que una semana después de la recogida de muestras no se presentarían ante su granja funcionarios del departamento de salud pública vestidos con trajes aislantes. Ello animó a varios granjeros a aceptar la propuesta.

Hoy en día, sin embargo, muy pocas secuencias genéticas de virus descubiertos en cerdos se cargan a las bases de datos en línea, como GenBank o GISAID, desde donde podrían ser recuperadas por investigadores de la gripe de todo el mundo. Existe un tremendo vacío de información. «No se puede asegurar que esos datos sean representativos de los virus que hoy circulan entre los cerdos —afirma Cox— lo que preocupa sobremanera a los responsables de la salud pública. Comprendemos las dificultades de los ganaderos. Pero queremos hallar una solución para aumentar el intercambio de la información disponible.»

COLABORACIÓN NECESARIA

Los CDC habían incentivado ese intercambio antes incluso de la pandemia de 2009: acordaron con el Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA) un programa que se encargaría de informar a los responsables sanitarios sobre los datos analíticos de los animales. Pero el programa, que todavía se halla en sus inicios, no puede funcionar sin la colaboración de los productores de ganado porcino, quienes hasta la fecha se han mostrado reticentes a apoyar lo que muchos consideran una intromisión del Gobierno. «Mientras la infección no pertenezca al grupo de las "enfermedades del programa", aquellas que representan un riesgo para la cabaña nacional, lo que ocurra a los animales atañe únicamente a los granjeros, no al Gobierno», comenta Paul Sundberg, vicepresidente de ciencia y tecnología de la Junta Nacional de Ganado Porcino.

Para vencer la reticencia de los granjeros, el sistema de vigilancia de los CDC y del USDA contempla varios compromisos fundamentales. Para empezar, se garantiza el anonimato. La información sobre virus descubiertos en muestras enviadas por los productores a los laboratorios puede incorporarse a un sistema de vigilancia de mayor accesibilidad. Pero a menos que un productor lo autorice, antes de transferir los datos se elimina cualquier elemento que permita identificar su granja. Las autoridades pueden averiguar el estado donde se ha descubierto el virus, pero no el condado o la granja concreta. «Los resultados de los análisis se introducen en el programa de forma anónima. Ninguna información referente al propietario o al veterinario que envía las muestras se incluirá en los datos», afirma John R. Clifford, veterinario jefe del USDA.

Los productores pueden aceptar que se incluyan datos identificativos, pero a buen seguro muy pocos de ellos prescindirán de la protección del anonimato. Las reglas del sistema también estipulan que si una persona resulta infectada por un virus de gripe porcina, el propietario de cualquier cabaña con la que esa persona haya mantenido contacto debe dar el consentimiento antes de que las autoridades puedan analizar sus cerdos. Si los CDC detectan un caso humano o un virus con el potencial de infectar a las personas, ¿se levantaría el velo del anonimato en aras de proteger la salud de la población? Sundberg afirma que si los CDC identificasen un virus problemático, podrían alertar al departamento de salud del estado pertinente para que se dispusiera a localizar casos humanos.

Los productores no ignoran la amenaza que suponen los virus de la gripe porcina para las personas, afirma Sundberg, quien apoya el nuevo sistema de vigilancia de los CDC y del USDA, pero creen que a veces se exagera su importancia. Millones de cerdos entran en contacto con las personas cada día y, sin embargo, los casos de humanos infectados por cerdos son muy infrecuentes. Los granjeros advirtieron lo que sucedió a Arnold Van Ginkel, el productor canadiense con la primera cabaña que dio positivo a la pandemia H1N1. Los cerdos de Van Ginkel se recuperaron pero tuvo que sacrificar a los animales porque nadie estaría dispuesto a comprarlos.

Aunque el número de muestras víricas enviado al nuevo sistema de vigilancia de los CDC y el USDA comenzó a aumentar en la segunda mitad de 2010, muchos médicos y epidemiólogos temen la excesiva protección de los datos que confieren los compromisos del sistema. Les preocupa no poder identificar a tiempo nuevos virus porcinos o el salto de un virus porcino a una persona y emprender así acciones que beneficien a la salud humana. Pero no han abandonado el objetivo de mejorar el acceso a la información. Con ese fin, Cox, de los CDC, e Ilaria Capua, que dirige un laboratorio de referencia de la Organización Mundial para la Salud Animal en Padua, el pasado febrero organizaron en Italia un encuentro entre científicos y las principales agencias de salud animal y humana. Capua se muestra moderadamente optimista; cree que hay formas de sortear los obstáculos.

Aunque las decisiones políticas relativas a la vigilancia de los cerdos avancen con lentitud, la gripe está evolucionando a una velocidad alarmante. «Las reglas biológicas han cambiado en los últimos 20 años y, por lo tanto, debemos pensar de otra manera», afirma Earl Brown, virólogo de la Universidad de Otawa especializado en la evolución de la gripe. Los productores de ganado porcino tienen mucho que perder ante cualquier publicidad negativa. Sin embargo, si surge entre los cerdos un sucesor virulento del virus que causó la pandemia de 2009, el daño nos afectará a todos.

PARA SABER MÁS

The pig as a mixing vessel for influenza viruses: Human and veterinary implications. Wenjun Ma et al. en *Journal of Molecular and Genetic Medicine*, vol. 3, n.º 1, págs. 158-166, 27 de noviembre de 2008.

Characterization of an influenza A virus isolated from pigs during an outbreak of respiratory disease in swine and people during a county fair in the United States. Amy L. Vincent et al. en *Veterinary Microbiology*, vol. 137, págs. 51-59, 28 de mayo de 2009.

Emergence and pandemic potential of swine-prigin H1N1 influenza virus. Gabriele Neumann et al. en *Nature*, vol. 459, págs. 931-939, 14 de junio de 2009.

Antigenic and genetic characteristics of swine-origin 2009 A(H1N1) influenza viruses circulating in humans. Rebecca J. Garten et al. en *Science*, vol. 325, págs. 197-201, 10 de julio de 2009.



Carl Zimmer es autor de nueve libros y escribe con regularidad sobre ciencia en periódicos y revistas como *The New York Times, National Geographic* y *Discover*.



NEUROCIENCIA

Cien billones de conexiones

Tras el ruido de millones de neuronas que se comunican entre sí puede esconderse la pista que nos lleve a entender la mente

Carl Zimmer

Una neurona en una placa de Petri chisporrotea solitaria. De vez en cuando, origina de forma espontánea una onda de corriente eléctrica que se desplaza por toda su longitud. Si se aplican pulsos de electricidad en uno de sus extremos, la neurona puede responder con picos adicionales de voltaje. Al incubarla junto con diversos neurotransmisores se puede modificar la intensidad y la frecuencia de sus ondas eléctricas. Por sí sola, una neurona no puede hacer mucho más. Pero un conjunto de 302 neuronas da lugar a un sistema nervioso que mantiene vivo al gusano *Caenorhabditis elegans* y se encarga de detectar el entorno del animal, tomar decisiones y dirigir órdenes al propio cuerpo. Y la unión de 100.000 millones de neuronas —con sus 100 billones de conexiones— origina el cerebro humano, con muchas más capacidades.

¿Cómo surge nuestra mente a partir de esa ingente cantidad de neuronas? La neurociencia, a pesar de todos sus logros, aún no está preparada para responder a esa pregunta. Algunos neurólogos dedican su carrera al estudio del funcionamiento individual de las neuronas. Otros eligen una escala superior y observan cómo el hipocampo, una agrupación de millones de neuronas, codifica los recuerdos. Y otros investigan el cerebro a una escala todavía más amplia, con el objetivo de identificar las regiones que se activan cuando realizamos una tarea, como leer o sentir miedo. Pero pocos han contemplado el cerebro en sus múltiples escalas a la vez. Su reticencia se debe, en parte, a la magnitud del desafío. Las interacciones entre unas pocas neuronas originan una confusa maraña de reacciones en ambos sentidos. Al añadir 100.000 millones de neuronas, el problema adquiere dimensiones cósmicas.

Sin embargo, algunos neurólogos creen que ha llegado la hora de abordar el desafío. Argumentan que jamás llegaremos a entender la mente si estudiamos el cerebro en fragmentos desconectados. Analizar sus componentes por separado equivaldría a imaginar la congelación del agua con una única molécula de agua. El hielo surge de la interacción de un vasto número de moléculas que se van acomodando de forma conjunta en los cristales.

Por fortuna, los neurólogos han hallado la inspiración en otros campos, donde durante decenios se ha estudiado la complejidad en sus múltiples formas, desde los mercados de valores hasta los circuitos de los ordenadores o las interacciones entre genes y proteínas en una célula. Podría parecer que una célula y el mercado de valores guardan muy poco en común, pero se han descubierto algunas similitudes básicas entre ambos sistemas. También se han desarrollado herramientas matemáticas para analizar esos sistemas. Los neurólogos están

EN SÍNTESIS

Una neurona sola apenas es funcional, pero la conexión de algunos cientos de ellas da lugar a un sistema nervioso primitivo, lo bastante sofisticado para dar vida a un gusano.

La unión de un número aún mayor de neuronas produce un organismo más complejo. La neurociencia intenta deducir la forma en que millones de neuronas configuran la mente humana.

Los neurólogos han comenzado a desentrañar la complejidad del cerebro al adoptar el tipo de estudios de otros sistemas complejos, desde los chips de ordenador hasta el mercado de valores.

Comprender el funcionamiento de las intrincadas redes del cerebro puede proporcionar pistas para entender el origen de enfermedades tan devastadoras como la esquizofrenia y la demencia.

MIRKO ILIC

esgrimiendo esas técnicas y empezando a utilizarlas para desentrañar la complejidad del cerebro. Aunque esos estudios todavía se hallan en sus inicios, los resultados son prometedores. Se están determinando las reglas que rigen la organización de millones de neuronas en redes que, a su vez, funcionan juntas como un entramado único y coherente: el cerebro. La organización de ese sistema determina en gran medida nuestra capacidad de interpretar un mundo sometido a constantes cambios. Y algunas de las enfermedades mentales más devastadoras, como la esquizofrenia y la demencia, podrían deberse al colapso de las redes que componen el cerebro.

Las neuronas forman redes al extender sus axones, que establecen conexiones con otras neuronas. Esos contactos permiten que una señal que se desplace por una neurona desencadene una onda de corriente en otras células. Como cada neurona se une a miles de otras —situadas cerca de ella o al otro lado del cerebro— las redes pueden adoptar un sinfín de configuraciones. La organización del entramado de un cerebro ejerce un tremendo efecto sobre su funcionamiento.

SIMULACIÓN DE UN CEREBRO

¿Cómo abordar el estudio de las redes neuronales? ¿Qué experimentos se deberían realizar para identificar los miles de millones de conexiones en este entramado? Una opción consiste en construir un modelo de cerebro en miniatura que describa el efecto de las diversas interacciones neuronales. El grupo de Olaf Sporns, de la Universidad de Indiana, llevó a cabo tal tarea. Creó 1600 neuronas simuladas, que distribuyó por la superficie de una esfera y que después conectó entre sí. En un momento dado, una célula presenta una probabilidad muy baja de emitir de forma espontánea un impulso nervioso. Cuando lo hace, existe asimismo una pequeña posibilidad de que la neurona desencadene el impulso en otras células conectadas a ella.

El grupo de Sporns experimentó con distintas conexiones neuronales y observó el modelo de cerebro en acción. En primer lugar, conectó cada neurona solo con sus vecinas más próximas. Esa red produjo pequeños destellos aleatorios de actividad. Cuando una neurona emitía un impulso nervioso de forma espontánea, originaba una onda eléctrica de corto alcance. A continuación, los investigadores conectaron todas las neuronas del cerebro entre sí, lo que dio lugar a un patrón muy distinto. El cerebro entero comenzó a activarse y desactivarse a intervalos regulares.

Las interacciones entre unas pocas neuronas dan lugar a una maraña de reacciones en ambos sentidos. Con miles de millones de células se obtiene la esencia de un sistema complejo

Por último, dotaron al cerebro de una red intermedia, creando conexiones locales y conexiones de largo alcance entre las neuronas. En ese momento el cerebro se volvió complejo. Cuando las neuronas comenzaron a emitir impulsos, se generaron zonas de actividad grandes y brillantes que se movían de un lado a otro del cerebro. Algunas zonas colisionaban entre sí; otras se desplazaban por el cerebro describiendo círculos.

El cerebro construido por Sporns nos ofrece una importante lección sobre el origen de la complejidad. La arquitectura de la red determina su patrón de actividad. Sporns y otros están aprovechando la información obtenida de los modelos del cerebro para intentar identificar patrones similares en el cerebro humano. Por desgracia, resulta imposible controlar todas y cada una de las neuronas de un cerebro real. De ahí que, mediante técnicas ingeniosas, estén registrando la actividad de un grupo reducido de neuronas y hayan extraído algunas conclusiones notables.

CEREBROS EN UNA PLACA DE PETRI

El grupo de Dietmar Plenz, un neurólogo del Instituto Nacional de Salud Mental de EE.UU., estudia la arquitectura del cerebro en placas de Petri, donde hace crecer fragmentos de tejido cerebral del tamaño de semillas de sésamo. Los investigadores colocan 64 electrodos en el tejido para detectar la emisión espontánea de impulsos nerviosos de las neuronas. Identifican así las avalanchas neuronales, unas ráfagas rápidas de actividad eléctrica.

En un principio, parece que las neuronas se limitan a chisporrotear de forma aleatoria. De ser cierto, cada avalancha neuronal se produciría de forma localizada o generalizada con la misma probabilidad. Sin embargo, Plenz observó otra pauta: las avalanchas de corto alcance eran las más frecuentes, mientras que las de gran alcance se producían pocas veces, cada vez menos al aumentar de extensión. En una representación gráfica, la probabilidad asociada a la extensión de la avalancha formaba una curva descendente de pendiente suave.

Ese tipo de curva ya se había descrito en otros campos de estudio. Los latidos del corazón no son idénticos. La mayoría de ellos dura algo más o algo menos que la media. Un número reducido de latidos son mucho más largos o mucho más cortos, y un número aún menor se aleja todavía más de la media. Los terremotos siguen el mismo patrón. El movimiento de las placas continentales provoca numerosos terremotos pequeños y unos pocos de mayor intensidad. Durante una epidemia, cada día aparecen algunos casos de enfermedad, pero de vez en cuando el número de casos nuevos se dispara. Si se representan en un gráfico los latidos del corazón, los terremotos o el número de nuevos enfermos, se obtiene una curva que va decayendo de forma exponencial.

El comportamiento exponencial es característico de las redes complejas que abarcan a la vez conexiones de corto y de largo alcance. Un temblor en un punto de la tierra se propaga a veces en una zona reducida. En raras ocasiones, el movimiento se extiende a través de una región mucho más amplia. Las neuronas operan de la misma forma: algunas veces solo excitan a sus vecinas más próximas, pero en ocasiones desencadenan una onda de actividad generalizada.

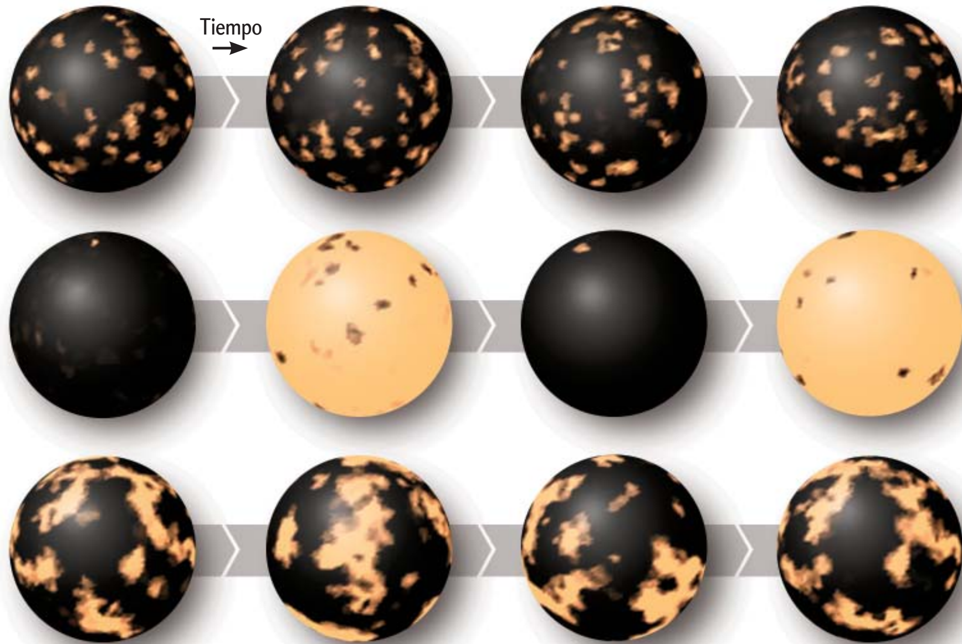
La forma de una curva exponencial ofrece información sobre el tipo de red que la ha producido. El equipo de Plenz experimentó con varias redes neuronales para determinar las que originarían avalanchas similares a las reales. Consiguieron la mejor aproximación con una red que contenía 60 grupos de neuronas. Cada conjunto estaba conectado, por término medio, con otros 10. Las conexiones no se distribuían de forma aleatoria: algunos grupos establecían numerosas conexiones, mientras muchos otros solo presentaban unas pocas. Como resultado, el número de conexiones de un grupo concreto con cualquier otro era muy reducido. Esa organización recibe la denominación de red de mundo pequeño.

Ese tipo de red confiere una enorme sensibilidad a nuestros cerebros ante las señales externas, de la misma forma en que un potente micrófono amplifica una variedad de sonidos. El

Anatomía de un cerebro simplificado

El modelo de cerebro construido por el equipo de Olaf Sporns, de la Universidad de Indiana, permite identificar tres patrones de conexión entre 1600 neuronas virtuales dispuestas de forma ordenada sobre la superficie de una esfera. La simulación —en la que algunas neuronas se activan de manera espontánea (*amarillo*) y el resto permanecen aletargadas— ayuda a deducir las interacciones complejas que se originan en diversos tipos de redes, algunas de las cuales reproducen la actividad de los circuitos cerebrales reales.

Las neuronas que solo están conectadas con sus vecinas más próximas muestran destellos de actividad aislados y aleatorios a lo largo del tiempo.



Cuando todas las neuronas se hallan conectadas entre sí, el cerebro desarrolla patrones de actividad a gran escala en los que el conjunto de células se activa o desactiva casi por completo.

Una mezcla de conexiones de corto y largo alcance da lugar a una actividad moderada e imprevisible que se asemeja a la de los cerebros reales.

equipo de Plenz aplicó descargas eléctricas de distinta intensidad y midió la reacción de las neuronas. Descubrió que las descargas leves provocaban respuestas en un número limitado de neuronas. Las descargas intensas desencadenaban una fuerte reacción en un grupo más amplio.

Para observar la influencia de la estructura de la red en esa respuesta, Plenz añadió a las neuronas un fármaco que debilitaba sus conexiones. En esas condiciones, las células dejaban de reaccionar a las descargas leves. Los científicos obtuvieron un resultado distinto cuando inyectaron un medicamento que favorecía la estimulación de las neuronas ante las señales de células vecinas. En esta ocasión describieron una respuesta intensa de las neuronas ante las señales leves, de tal magnitud que se parecía a la que se producía cuando las señales eran fuertes. Estos experimentos pusieron de manifiesto el fino ajuste de las redes neurales, característica que les permite transmitir las señales de manera precisa. Si las neuronas estuviesen organizadas en una red distinta, transmitirían señales incoherentes y sin sentido.

En última instancia, los neurólogos desean saber si la actividad observada en una placa de Petri guarda alguna relación con los procesos mentales cotidianos. Al estudiar el cerebro entero, los experimentos revelan patrones de actividad espontánea que se asemejan a los que Plenz identifica en sus pequeños fragmentos de tejido cerebral. El equipo de Marcus E. Raichle, de la Universidad de Washington en St. Louis, ha descubierto que cuando descansamos, sin pensar en nada concreto, se desplazan por todo el cerebro ondas de electricidad de patrones complejos [*véase* «La red neuronal por defecto», por Marcus E. Raichle; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2010]. Experimentos recientes indican que esa actividad espontánea podría desempeñar una función crucial en nuestra vida mental. Permitiría a la mente en reposo reflexionar sobre aspectos internos, como revisar recuerdos y elaborar planes para el futuro.

CARTOGRAFÍA NEURAL

Para comprender el comportamiento de esas ondas, los neurólogos están intentando cartografiar las conexiones que establecen las neuronas en todo el cerebro. No se trata de un desafío menor. Sporns ha liderado uno de los proyectos de cartografiado más ambiciosos. En colaboración con Patric Hagmann, de la Universidad de Lausanne, y su grupo de neuroimagen, analizó los datos de cerebros de cinco voluntarios, tras la obtención de imágenes de espectros de difusión. Esa técnica detecta los axones recubiertos por una fina capa de grasa, las largas fibras que conectan las diversas regiones de la corteza y que forman la sustancia blanca del cerebro. Los científicos seleccionaron casi 1000 regiones de la corteza y cartografiaron las conexiones de sustancia blanca entre las distintas regiones.

A continuación, crearon una versión simulada de las 1000 regiones y experimentaron con ella para observar los tipos de patrones que produciría. Cada región generó señales que se desplazaban a las regiones conectadas; las neuronas de esas zonas emitían a su vez señales similares. Cuando los investigadores pusieron en marcha el cerebro virtual, este empezó a producir

OLAF SPORNS, UNIVERSIDAD DE INDIANA

ondas de actividad que fluctuaban con lentitud. Sorprendentemente, las ondas se parecían a las reales, observadas por Raichle y otros en cerebros en reposo.

La red del cerebro que el grupo de Sporns cartografió se organizaba de forma muy similar a la red más pequeña que Plenz descubrió en sus pequeños fragmentos de tejido, una red de mundo pequeño con unas pocas centralitas (*hubs*) muy bien conectadas. Esa arquitectura a gran escala ayuda a que nuestros cerebros economicen recursos y trabajen de forma más eficaz. Necesitamos una enorme cantidad de recursos para hacer crecer y mantener la sustancia blanca. Con unas pocas centralitas bien comunicadas nuestro cerebro precisa mucha menos sustancia blanca que con redes de otro tipo. Y como hacen falta pocas conexiones para ir de una parte del cerebro a otra, la información se procesa con mayor rapidez.

Gracias al Proyecto Conectoma Humano, en los próximos años los neurólogos elaborarán mapas perfeccionados de las redes cerebrales. Puesto en marcha el año pasado por el Instituto Nacional de la Salud (NIH) y financiado con 30 millones de dólares, el proyecto inspeccionará todas y cada una de las conexiones existentes entre las neuronas de un cerebro adulto. Pero ni siquiera este mapa recogerá por sí solo toda la complejidad del cerebro. Ello se debe a que las neuronas utilizan solo un subconjunto de las conexiones cerebrales para comunicarse con otras. De cuando en cuando, las células sustituyen unas conexiones por otras y la red cambia de forma. La creación de modelos del cerebro que reflejen esas redes dinámicas exigirá todos los recursos que la teoría de la complejidad pueda ofrecer.

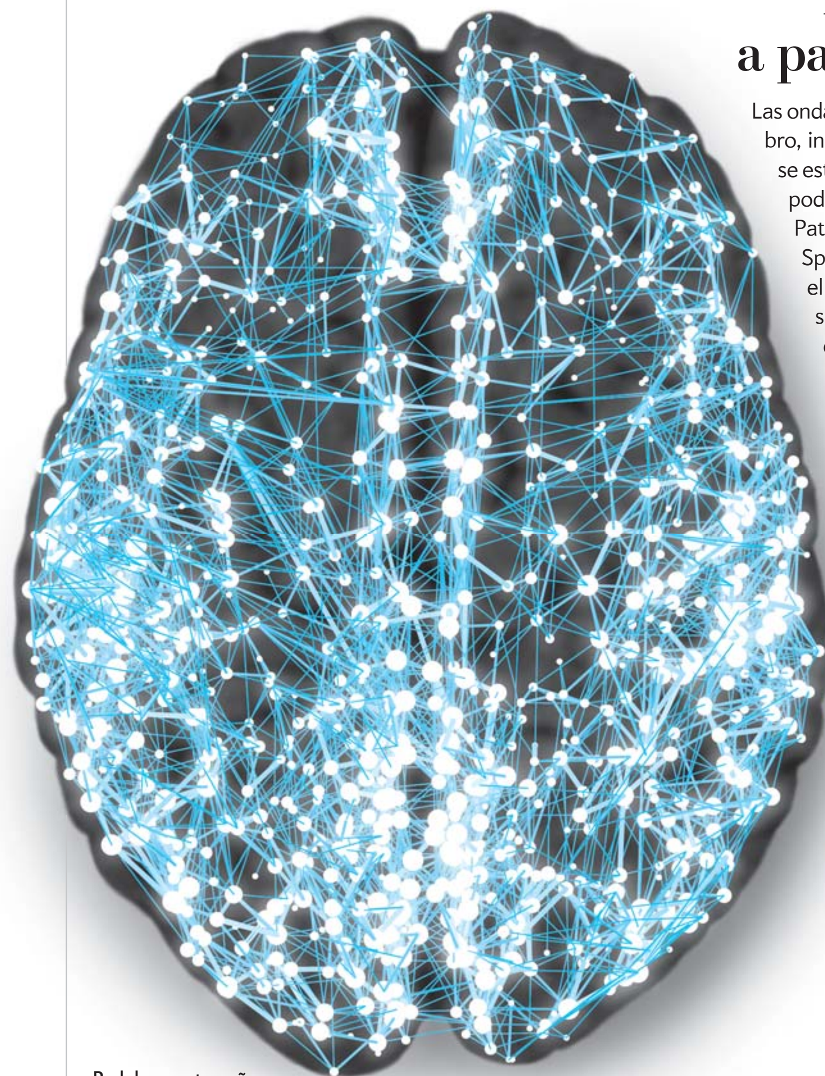
LA NEURONA DE WALL STREET

Dos matemáticos de la Universidad de Dartmouth, Daniel N. Rockmore y Scott D. Pauls, intentan analizar esa complejidad mediante la comparación del cerebro con el mercado de valores. Ambos sistemas constan de numerosas pequeñas unidades —corredores de bolsa, neuronas— organizadas en una red de gran alcance. Los corredores de bolsa influyen unos sobre otros según su forma de comprar y vender; esa influencia puede llegar a afectar la totalidad de la red, haciendo que el mercado de valores suba o baje. A su vez, la red puede influir sobre los ni-

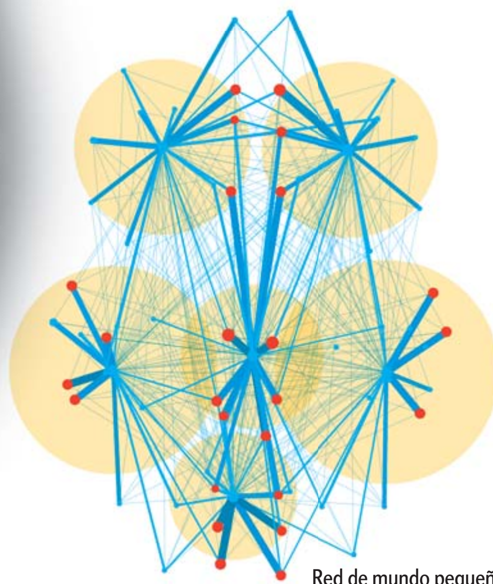
CARTOGRAFÍA DEL CEREBRO

Mundos pequeños a partir de redes extensas

Las ondas de actividad eléctrica se desplazan a través del cerebro, incluso cuando este se halla en reposo. En la actualidad se está intentando cartografiar estos patrones neurales, que podrían desempeñar una función crucial en la vida mental. Patric Hagmann, de la Universidad de Lausanne, y Olaf Sporns, de la Universidad de Indiana, han cartografiado el cerebro mediante la obtención de imágenes con tensor de difusión. Descubrieron que la densa red de conexiones (*izquierda*) posee unas pocas centralitas muy bien comunicadas por las que atraviesan numerosas conexiones (*abajo*). Puede que estas redes de centralitas «de mundo pequeño» contribuyan al procesamiento rápido de la información y a la integridad estructural del cerebro.



Red de gran tamaño



Red de mundo pequeño

JEN CHRISTIANSEN. FUENTE: «MAPPING THE STRUCTURAL CORE OF HUMAN CEREBRAL CORTEX», POR P. HAGMANN ET AL. EN *PLOS BIOLOGY*, VOL. 6, N.º 7, 2008

veles más bajos. Tal efecto sucede cuando el mercado de valores comienza a repuntar y los inversores particulares desean subirse al carro, con lo que la bolsa crece aún más.

El equipo de Rockmore y Pauls desarrolló un conjunto de herramientas matemáticas para desentrañar la estructura de la red que subyace a la Bolsa de Nueva York. Se descargaron de la Red los precios diarios al cierre del mercado de 2547 valores de renta variable durante 1251 días y, a continuación, buscaron similitudes entre los cambios de precio experimentados por los distintos valores, como una tendencia al alza o a la baja durante el mismo periodo de tiempo.

Esta búsqueda reveló la existencia de 49 agrupaciones de valores. Cuando los científicos centraron la atención en los datos financieros, descubrieron que las agrupaciones correspondían, en su mayor parte, a determinados sectores de la economía, como empresas de *software* o restaurantes, o bien a ciertas regiones, como Latinoamérica o la India.

El hallazgo de esas categorías mediante el simple análisis de los datos reforzó la validez de los métodos empleados. Después de todo, tiene sentido que las acciones de las compañías que proporcionan acceso a Internet tiendan a subir o a bajar en tándem. Un peligroso gusano informático podría significar una fuente de problemas para todo el grupo.

Rockmore y Pauls descubrieron también que las 49 agrupaciones estaban organizadas en 7 supergrupos. Estos estaban formados muchas veces por industrias con una dependencia mutua. Los centros comerciales y las compañías constructoras van de la mano. Los investigadores observaron que los supergrupos se hallaban conectados en un bucle gigantesco. Ese bucle era probablemente el resultado de la rotación sectorial, una práctica habitual entre los directores de inversiones. A lo largo de varios años, los inversores suelen mover su dinero de un sector de la economía a otro.

En la actualidad, Rockmore y Pauls están utilizando los mismos métodos matemáticos para construir un modelo del cerebro. En vez de información financiera que se desplaza de una parte del mercado a otra, estudian el tránsito de información entre distintas regiones cerebrales. Y del mismo modo que los mercados financieros poseen redes variables, el cerebro puede reorganizar su red de un momento a otro.

Para comprobar su modelo, Rockmore y Pauls analizaron en tiempo reciente las imágenes de resonancia magnética funcional (RMf) del cerebro de una persona en reposo obtenidas por el equipo de Raichle. Observaron altibajos en la actividad de cada vóxel, que representa el mínimo volumen de tejido (del tamaño de un grano de pimienta) del que se pueden obtener imágenes de RMf. Del mismo modo que habían descrito agrupaciones de valores de renta variable en la Bolsa, descubrieron que los vóxeles se podían clasificar en 23 grupos. Y esos grupos, a su vez, pertenecían a 4 agrupaciones de mayor tamaño. Sorprendentemente, los 4 supergrupos representaban una versión neuronal de la rotación de sectores identificada en el mercado de valores. Se hallaban conectados entre sí en un bucle y las ondas de actividad se desplazaban a través de ellos de forma cíclica.

Tras haber reconstruido la red de un cerebro en reposo, Rockmore y Pauls centran ahora su atención en el cerebro pensante. Intentan comprender los cambios de organización del cerebro mediante el análisis de datos de RMf de personas a las que se muestra una serie de objetos. Si su modelo funciona, podrán predecir el tipo de resultados que obtendría un neurólogo al realizar un escáner de una persona que contempla un determinado estímulo, como el rostro de un viejo amigo. Este logro convertiría la neurociencia en una ciencia predictiva.

Todavía falta tiempo para que ese tipo de estudios permita descifrar por completo la complejidad del cerebro humano. El ejemplo del nemátodo *C. elegans* lo ilustra bien: aunque el cartografiado de las conexiones existentes entre sus 302 neuronas finalizó hace más de 20 años, aún no se ha averiguado el modo en que esa sencilla red da lugar a un sistema nervioso funcional.

NEUROLOGÍA DE LA RED

Puede que no sea necesaria la elaboración de un diagrama completo de las conexiones del cerebro para conocer algunos aspectos prácticos importantes. Una serie de estudios sugiere que ciertas enfermedades del cerebro no se deben al mal funcionamiento de una región concreta, sino a una alteración en la propia red. El grupo de Sporns se preguntó cómo cambiaría la red de mundo pequeño que habían identificado si desconectaban diferentes nódulos. Si lo hacían en una región del cerebro que presentaba escasas conexiones con sus vecinas, la red, en su conjunto, seguía comportándose igual que antes. Pero si desconectaban una centralita, los patrones de actividad a través de toda la red cambiaban de manera espectacular. Este hallazgo puede explicar la asombrosa imprevisibilidad de los daños cerebrales. En algunas ocasiones, un tumor o una apoplejía que desactivan una diminuta parcela de neuronas provocan daños devastadores. Pero otras veces se destruye gran parte de la estructura neurológica sin causar ninguna alteración apreciable en el funcionamiento del cerebro.

Varias enfermedades mentales podrían también tener su origen en trastornos de la red. El equipo de Ed Bullmore, neurólogo de la Universidad de Cambridge, ha investigado la posible relación entre las redes del cerebro y la esquizofrenia. En un estudio reciente, obtuvo imágenes de RMf de 40 personas con esquizofrenia y de 40 personas sanas mientras permanecían en reposo, con los ojos abiertos. A continuación cartografió la red de las regiones que se mantenían activas. Descubrió que algunas regiones de la red en el estado de reposo se hallaban más sincronizadas en los cerebros esquizofrénicos que en los normales.

De momento se desconoce la relación entre la esquizofrenia y las alteraciones de la red cerebral. De todos modos, se podrían utilizar esos conocimientos para desarrollar pruebas para detectar la esquizofrenia y otras enfermedades, como el autismo y el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH), de las que hay indicios que afectan a las redes del cerebro. Además, los médicos podrían controlar el progreso de sus pacientes al observar en ellos la recuperación de las redes. Este tipo de avances sería bien recibido, aunque todavía debamos esperar más tiempo hasta que se descifre la complejidad del cerebro en su totalidad.

PARA SABER MÁS

Theoretical neuroanatomy: relating anatomical and functional connectivity in graphs and cortical connection matrices. O. Sporns, G. Tononi y G. M. Edelman en *Cerebral Cortex*, vol. 10, n.º 2, págs. 127-141, febrero de 2000.

Mapping the structural core of human cerebral cortex. Olaf Sporns et al. en *PLoS Biology*, vol. 6, n.º 7, e159, julio de 2008.

Efficient network reconstruction from dynamical cascades identifies small-world topology of neuronal avalanches. Sinsia Pajevic y Dietmar Plenz en *PLoS Computational Biology*, vol. 5, n.º 1, e1000271, enero de 2009.

Networks of the brain. Olaf Sporns. MIT Press, 2010.

Brain cuttings: fifteen journeys through the mind. Carl Zimmer. Scott & Nix, Inc., edición electrónica, octubre de 2010.

por Anna Kuchment



1
Caraño, manglillo
FAMILIA: Olacáceas
GÉNERO: *Chaunochiton*



2
Haba, guanacaste
FAMILIA: Fabáceas
GÉNERO: *Enterolobium*



3
Calabaza
FAMILIA: Cucurbitáceas
GÉNERO: *Melothria*



4
Palmera
FAMILIA: Arecáceas
GÉNERO: *Desmoncus*

Semillas de la Amazonia

Los botánicos han recolectado semillas de una de las regiones con mayor diversidad biológica

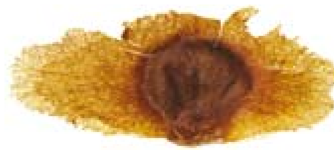
Algunas muestran el aspecto de un cerebro, otras parecen puntas de flecha y otras recuerdan a cuentas, hélices o borlas de algodón. Las semillas han adquirido a lo largo de la evolución numerosas formas sorprendentes que les han facilitado la propagación. Con su brillante color rojo y forma de cuentas, las semillas del árbol de *Ormosia* (*8*) atraen a las aves; estas las confunden con bayas, las extraen del fruto para ingerirlas y, a través de los excrementos, las distribuyen sobre un territorio extenso. Las semillas con alas (*18, 19*) son transportadas por las corrientes de aire; algunas (*12*) presentan mayor peso en la parte inferior, lo que les permite asentarse en el suelo de la selva para luego germinar; otras (*5, 22*) prolongan su viaje flotando a lo largo de ríos o arroyos. Se ilustran aquí solo algunas de las 750 semillas que los botánicos Fernando Cornejo y John Janovec, del Instituto de Investigaciones Botánicas de Texas, han clasificado en tiempo reciente en zonas naturales de la Amazonia. Su tamaño varía desde los cinco milímetros (*10*), las dimensiones de una lenteja, hasta 100 milímetros (*1*), similar al de una rosquilla. «Las semillas se hallan en la base de la diversidad vegetal», afirma Janovec. «Representan el programa genético que se transmite al futuro». Su guía de campo, *Seeds of Amazonian Plants*, publicada por Princeton University Press, ayudará a comprender la regeneración de los bosques, la dispersión de las plantas y la evolución conjunta de las variadas especies de esta región tropical.



17
Monimia
FAMILIA: Monimiáceas
GÉNERO: *Mollinedia*



18
Aristoloquia
FAMILIA: Aristoloquiáceas
GÉNERO: *Aristolochia*



19
Enredadera de trompeta
FAMILIA: Bignoniáceas
GÉNERO: *Anemopaegma*



20
Calabaza
FAMILIA: Cucurbitáceas
GÉNERO: *Selysia*

DAVID LIITTSCHWAGER



5
Guayacán, palo de culebra
FAMILIA: Litráceas
GÉNERO: *Lafoensia*



6
Anacardo
FAMILIA: Anacardiáceas
GÉNERO: *Antrocaryon*



7
Borracha, caucho
FAMILIA: Euforbiáceas
GÉNERO: *Hevea*



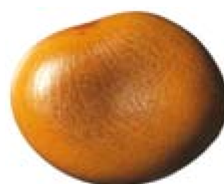
8
Huayruro
FAMILIA: Fabáceas
GÉNERO: *Ormosia*



9
Correhuela
FAMILIA: Convolvuláceas
GÉNERO: *Calycobolus*



10
Granadilla, curuba
FAMILIA: Pasifloráceas
GÉNERO: *Passiflora*



11
Haba
FAMILIA: Fabáceas
GÉNERO: *Dialium*



12
Palo santo
FAMILIA: Poligonáceas
GÉNERO: *Triplaris*



13
Palmera
FAMILIA: Arecáceas
GÉNERO: *Hyospathe*



14
Adelfa
FAMILIA: Apocináceas
GÉNERO: *Macoubea*



15
Granadilla, curuba
FAMILIA: Pasifloráceas
GÉNERO: *Passiflora*



16
Haba
FAMILIA: Fabáceas
GÉNERO: *Parkia*



21
Icacina
FAMILIA: Icacináceas
GÉNERO: *Calatola*



22
Rosa brasileña
FAMILIA: Coclospermáceas
GÉNERO: *Cochlospermum*



23
Sabia
FAMILIA: Sabiáceas
GÉNERO: *Meliosma*



24
Suari, piqui
FAMILIA: Cariocaráceas
GÉNERO: *Caryocar*

por Eulalia Pérez Sedeño

Eulalia Pérez Sedeño es profesora de investigación en el departamento de ciencia, tecnología y sociedad del Instituto de Filosofía del CSIC.



El conocimiento situado

Los enfoques feministas arrojan luz sobre la importancia del contexto en la construcción del conocimiento científico

El feminismo ha contribuido de manera fundamental a cambiar el modo de entender la ciencia y la tecnología. Como movimiento político, se ha preocupado por mejorar la situación de las mujeres en la ciencia, que exhibe discriminaciones territoriales (las mujeres se concentran en disciplinas supuestamente «femeninas») y jerárquicas (pocas acceden a la parte superior de la escala). Como teoría, el feminismo ha protagonizado la crítica más completa, aunque no la única, a la concepción clásica de la ciencia y la tecnología. Aunque las aproximaciones feministas a la ciencia son múltiples y variadas, todas coinciden en su crítica a la supuesta neutralidad y objetividad de la ciencia, nociones ambas sustentadas en ciertos principios de la filosofía tradicional de la ciencia, que servían para delimitar las tareas de la filosofía de la ciencia frente a otras disciplinas.

Uno de esos principios tradicionales era la distinción entre «hechos» y «valores». Se trata de una distinción dicotómica, excluyente y jerárquica, pues consideraba que los hechos pertenecían a una categoría superior a la de los valores. Así, la filosofía de la ciencia debía ocuparse solo de los enunciados acerca de «lo que es», mientras que los juicios de valor, sobre «lo que debe ser», quedaban *relegados* a otro dominio.

Otro principio tradicional corresponde a la distinción entre «contexto de descubrimiento» y «contexto de justificación». En el primero intervienen aquellos factores que influyen en los investigadores cuando estos establecen las hipótesis o prácticas científicas; al segundo solo le importa o le interesa la confirmación o refutación de las hipótesis científicas (a partir de las pruebas y el razonamiento). La filosofía de la ciencia dominante durante gran parte del siglo XX se centró solo en el contexto de justificación. Consideraba que ese proceso distinguía a la ciencia de cualquier otra actividad y generaba la objetividad característica del conocimiento científico, basada en la neutralidad, la autonomía y la imparcialidad.

Que la ciencia sea neutral significa que las teorías no implican ni presuponen juicios sobre valores no cognitivos, es decir, que la ciencia no sirve a unos valores más que a otros. Que sea autónoma quiere decir que no está influida por valores o movimientos socioculturales o políticos. Y que sea imparcial implica que el único criterio para aceptar o refutar una teoría científica son las pruebas objetivas, no los valores. Así, se distingue entre valores cognitivos (o epistémicos) y valores no cognitivos (o contextuales). Los primeros se hallarían en la base de las reglas metodológicas que determinan lo que constituye una práctica científica aceptable (contexto de justificación). Los segundos pertenecerían al ámbito cultural y social en el que se desarrolla la actividad científica (contexto de descubrimiento).



ANDREAS KERMANN/ISTOCKPHOTO

La reflexión feminista sobre la ciencia pone en cuestión esas dicotomías clásicas. Se nutre de las críticas a los métodos, hipótesis, teorías y prácticas científicas, de las lecturas feministas de la historia de la filosofía, de la investigación sobre psicología educativa y del análisis de los supuestos de la epistemología analítica tradicional.

Desde esa óptica, han sido criticadas ciertas tesis de la sociobiología y, en fecha más reciente, de la psicología evolucionista, así como otras sobre el desarrollo, la conducta o la cognición, basadas en la endocrinología y la neurología. Dichas críticas han hecho aparecer numerosas deficiencias metodológicas y de otro tipo. Fallos en el diseño experimental, supuestos basados en datos experimentales limitados, extrapolaciones insostenibles, manipulaciones técnicas y uso de argumentos falaces, entre otros. Hallamos un ejemplo paradigmático en las afirmaciones que, basadas en ciertos hechos supuestamente universales (como la agresividad de los machos primates y el sometimiento de las hembras de esas especies) pretenden perpetuar el estatus de dominación y subordinación de las mujeres y justificar su situa-

ción social: no solo se comete una falacia lógica (el paso del *es* al *debe*), sino una extrapolación insostenible.

Estudios realizados desde el feminismo han mostrado que los valores contextuales interactúan con la práctica de la ciencia y la tecnología de diversas maneras. En primer lugar, tienen un efecto canalizador o rector sobre la investigación y sobre las decisiones políticas acerca de las aplicaciones técnicas del conocimiento científico. La conformidad o el conflicto de esas prácticas científico-técnicas con ciertos valores ha generado disonancias. Pensemos en el uso de la energía nuclear: algunos científicos están a favor; otros, en contra. Los «mismos hechos» se interpretan de manera distinta en función de los valores y las prioridades.

Asimismo, los conflictos entre los valores éticos y los métodos de investigación pueden hacer variar los protocolos metodológicos, como sucede en el campo de la investigación con animales —sean humanos o no—. Los valores contextuales pueden incluso determinar lo que hay que preguntar y lo que es mejor ignorar respecto de un fenómeno dado. Y pueden afectar también a la descripción de las observaciones y los experimentos, así como a la selección de los datos y el tipo de fenómenos que se quiere investigar.

Además de las críticas ya mencionadas, los enfoques feministas se caracterizan por su escepticismo respecto de la posibilidad de una teoría general del conocimiento, que ignore el contexto social y el estatuto de los sujetos que conocen. La teoría del conocimiento tradicionalmente ha partido de la base de que quien produce conocimiento es un sujeto individual, genérico y autosuficiente, es decir, «aislado» de condicionamientos externos, pura conciencia abstracta e ideal. Este sujeto, a veces llamado sujeto cartesiano, ha sido entendido como un «sujeto universal». Ello implica que todos los sujetos son intercambiables, es decir, quién sea el sujeto concreto es irrelevante para el resultado del conocimiento.

Amén de inexistente, ese sujeto incondicionado resulta *engañoso* y *peligroso* en lo que a sus consecuencias prácticas se refiere. Lo que se ha tomado por incondicionado y universal, en el fondo ha incorporado rasgos epistémicos de ciertos sujetos concretos y ha ocultado o marginado los de otros, con las consecuencias materiales y de distribución de poder que ello conlleva. La pretendida imparcialidad esconde una parcialidad que ha dado primacía a los intereses, objetivos y valores de cierto grupo, o grupos, sobre los de otros (no solo mujeres, sino también negros, indios, etcétera).

El feminismo critica precisamente la idea de ese sujeto abstracto e incondicionado. No es real. Los científicos no están ni trabajan aislados. Colaboran entre sí de manera socialmente organizada y desarrollan su actividad en contextos sociales, políticos e históricos concretos.

No existe, pues, un conocimiento objetivo proveniente «de ninguna parte». Todo conocimiento lleva la marca de su autor o autora: es un *conocimiento situado*. Pero, además, el momento, lugar, o situación (de todo tipo) en que alguien produce conocimiento afecta a qué y cómo se conoce, es decir, a qué denominamos conocimiento y, en definitiva, al contexto de justificación. Dicho de otro modo, es diferente lo que se consideraba conocimiento en la Babilonia del siglo X a.C., en la Italia del siglo XV o en la China del mismo período. Incluso hoy, el conocimiento que producen las comunidades del centro difiere del que se genera en la periferia. Los condicionantes de cada época y comunidad resultan determinantes. Y lo mismo puede decirse del género del sujeto, que puede ser *epistemológicamente significativo*, pues las relaciones políticas y sociales afectan a la capacidad de conocer y al contenido del conocimiento.

«Conocimiento» no significaba lo mismo en la Babilonia del siglo X a.C. que en la Italia del siglo XV o en la China del mismo período

Si la actividad científica se corresponde con un conjunto de prácticas sociales, la exclusión de ciertos grupos sociales supone necesariamente una limitación, no solo epistemológica, sino también política. Como todo movimiento político, el feminismo siempre ha tenido entre sus principales preocupaciones el rol del poder y sus conexiones con todos los aspectos de la vida social, incluida la ciencia. Si en la epistemología tradicional la neutralidad de la ciencia derivaba del carácter objetivo del conocimiento, ahora la afirmación del carácter situado del conocimiento implica la imposibilidad de desligar el conocimiento de «los hechos» de los valores de los sujetos, es decir, la imposibilidad de separar los valores epistémicos de los no epistémicos. Con ello se reconoce la introducción inevitable de lo político en el conocimiento.

El carácter político del conocimiento no se observa solo en sus aplicaciones o en el modo en que se organizan las instituciones científicas, sino también en sus contenidos y afirmaciones. Ello no significa que el feminismo abogue por el relativismo o por una epistemología del «todo vale», pues también al feminismo le interesa tener criterios para defender unas teorías y unas prácticas frente a otras.

La objetividad que propone el enfoque feminista viene dada por la discusión y evaluación, dentro de la comunidad, de los supuestos implícitos en las observaciones y en los razonamientos, en la preferencia por cierta hipótesis en lugar de otra o en la consideración de que ciertos métodos, en vez de otros, son los adecuados para resolver determinados problemas. Una discusión crítica que debe hacerse en igualdad de condiciones entre todos los miembros de la comunidad y sin que unos detenten más autoridad que otros, pues en ciencia, en principio, todo es revisable.

Para ello, nuestra ciencia debe ser sensible al contexto y a los sesgos culturales, debe estar alerta ante el antropomorfismo y el etnocentrismo. Tiene que respetar la naturaleza y desarrollar una ética de la cooperación con ella, a la par que debe alejarse del reduccionismo. Solo así se logrará una comunidad científica diversa, accesible e igualitaria, que efectúe sin trabas la crítica intersubjetiva que nos proporcionará un conocimiento fiable. Si queremos descubrir los supuestos implícitos en la ciencia, deberemos contar con tantos puntos de vista como sea posible. La ciencia occidental no puede lograr esa interacción completa, esta nueva forma de objetividad, sin integrar plenamente a las mujeres.

PARA SABER MÁS

Ciencia y feminismo. Sandra Harding. Ed. Morata; Madrid, 1986.

Science and social knowledge. Helen Longino. Princeton University Press; Princeton, 1990.

Feminism and philosophy of science. Elizabeth Potter. Routledge; Londres y Nueva York, 2006.

Mitos, creencias, valores: cómo hacer más «científica» la ciencia; cómo hacer la realidad más «real». Eulalia Pérez Sedeño en *Isegoría*, n.º 38, 2008. Disponible en **isegoria.revistas.csic.es/index.php/isegoria/article/view/404/405**

por Manuel Area Moreira



Manuel Area Moreira es catedrático de didáctica y organización escolar en la Universidad de La Laguna y experto en tecnologías educativas.

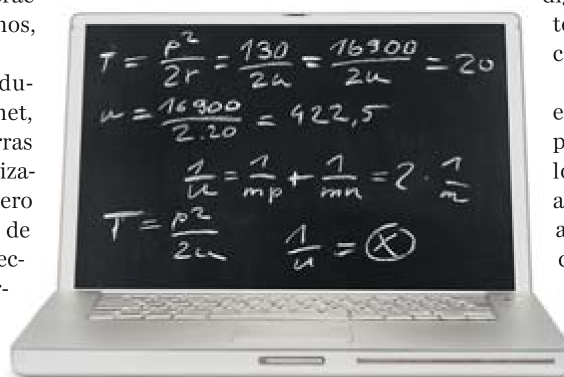
¿Se aprende mejor con las TIC?

Sin una renovación del modelo pedagógico, el beneficio de las tecnologías educativas es mínimo

La investigación de los últimos años ha demostrado que el aprendizaje mediante tecnologías de la información y la comunicación (TIC) constituye un fenómeno complejo en el que intervienen factores de distinta naturaleza. Sabemos, desde hace casi ya treinta años, que lo que aprendemos las personas a través de cualquier tipo de técnica de información (impresa, audiovisual o digital) depende fundamentalmente de la interacción de tres factores o dimensiones: el perfil del estudiante (conocimiento previo, motivación, estilo cognitivo, edad, contexto cultural); las características del material utilizado (diseño pedagógico, contenido, interfaz, organización hipertextual y eficiencia tecnológica, entre otros); y el contexto (tipo de actividad o tarea escolar que se realiza con dicho material, organización social de la clase, demandas evaluativas, interacción comunicativa con otros alumnos, etcétera).

La presencia de tecnología educativa abundante y variada (Internet, Wi-Fi, ordenadores portátiles, pizarras digitales, etcétera) es para el aprendizaje actual una condición necesaria, pero no suficiente. Si no va acompañada de un modelo educativo adecuado, la tecnología por sí sola no provoca de forma automática y generalizada mejoras en el aprendizaje de los estudiantes. El último informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (*¿Están los aprendices del nuevo milenio alcanzando el nivel requerido? Uso de la tecnología y resultados educativos en PISA*, OCDE, 2010) concluye que con las herramientas tecnológicas adecuadas y con un planteamiento educativo coherente y bien planteado, el uso frecuente del ordenador puede conducir a una mejora en el rendimiento de los estudiantes.

En ese sentido, la figura del docente resulta clave. Modula los efectos potenciales de las TIC sobre el aprendizaje ya que las acciones o tareas que el alumno realiza con dichas técnicas son consecuencia de las decisiones y el pensamiento pedagógico del profesor. Se ha comprobado que aquellos profesores con una visión educativa tradicional, que conciben el aprendizaje como una transmisión y recepción de información, tienden a demandar en los estudiantes tareas repetitivas con TIC o destinadas a la adquisición de contenidos conceptuales. Por el contrario, los docentes con una concepción más innovadora de la enseñanza, tienden a organizar situaciones de aprendizaje con ordenadores basadas en una mayor actividad del alumno, destinadas a favorecer procesos de búsqueda, análisis y reconstrucción del conocimiento.



Además del informe de la OCDE, otros estudios recientes (*America's Digital Schools*, 2008) han evaluado el impacto de la tecnología en las aulas según el modelo 1:1 (un ordenador por alumno). Señalan que se incrementa la motivación e interés del estudiante hacia el aprendizaje, se desarrollan las competencias digitales e informacionales del mismo, se incrementan las destrezas cognitivas para manejarse ante las nuevas formas expresivas de la cultura digital (hipertextos, multimedia, audiovisuales, comunicación en línea en redes sociales) y aumenta la capacidad de trabajo autónomo y en colaboración. Sin embargo, también se ha puesto de manifiesto que estas mejoras escolares no son inmediatas. Puesto que el profesorado debe aprender a usar pedagógicamente las nuevas herramientas e innovar su metodología de enseñanza, los resultados llegan tras un período de dos o tres años.

Asimismo, en el aprendizaje con TIC influyen variables de naturaleza sociocultural. Se ha comprobado que suele existir una notable relación entre el rendimiento escolar, el nivel sociocultural de la familia y la mayor frecuencia de uso del ordenador en casa. Por ello, otro beneficio relevante de las TIC en las escuelas es que ayudan a reducir la brecha digital, ya que se alfabetiza digitalmente al alumnado procedente de situaciones sociales desfavorecidas.

En conclusión, no puede afirmarse en términos absolutos que la mera presencia o disponibilidad de tecnologías educativas en las escuelas y aulas provoca, de forma más o menos automática y mecánica, una mejora del aprendizaje en todos los estudiantes. Mantener esta tesis sería una falacia o creencia ingenua provocada por la mitificación en el potencial didáctico de las TIC.

Los efectos positivos sobre el aprendizaje suelen darse siempre y cuando estas sean incorporadas a los procesos de trabajo escolar bajo un modelo pedagógico destinado a potenciar un aprendizaje experiencial y constructivista del conocimiento. Y ello sin olvidar la influencia de factores como la experiencia previa del alumnado con dichas técnicas, su grado de competencia digital, así como el nivel sociocultural y de uso de las TIC en su entorno familiar.

NARVIKK/ISTOCKPHOTO

por Pere Castells



Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

La crema perfecta

La temperatura y la acidez son factores clave para obtener elaboraciones óptimas

El día de San José es tradición en Cataluña degustar la crema catalana, uno de los dulces allí más populares. Según la receta tradicional, para elaborar este postre se necesita 1 litro de leche, 200 gramos de azúcar, 8 yemas de huevo, 40 gramos de almidón (que pueden sustituirse por harina u otros productos), canela en rama y piel de limón.

Primero se aromatiza la leche con la canela y la piel de limón. Se mezclan luego en un cuenco las yemas y el azúcar. Se añade la leche colada con el almidón ya disuelto. Se pone la mezcla al fuego. Cuando empieza a hervir, se retira. Se vierte la crema en recipientes individuales, donde se deja enfriar. Por fin, justo antes de servir, se espolvorea con azúcar y se tuesta con una plancha metálica candente para producir la caramelización —de aquí que se denomine también «crema quemada».

Al margen de la capa de caramelo, la crema de San José guarda una estrecha semejanza con la clásica crema pastelera, de mayor espesor (contiene unos 80 gramos de almidón por litro de leche). Menos espesas son las natillas (con unos 20 gramos de almidón por litro de leche) y la crema inglesa (sin almidón, pero con más yemas).

Veamos cuál es la función de cada ingrediente. La leche con la canela y la piel de limón definen el componente líquido aromatizado (en ocasiones se utilizan otros aromatizantes como la vainilla). El azúcar aporta dulzor y el sabor característico de la caramelización final; contribuye también a la retención de agua. Las yemas constituyen quizás el componente básico de la crema, las responsables de la textura cremosa. El almidón opera a modo de espesante.

Los procesos químicos que transforman esa mezcla en un postre delicioso tienen un claro protagonista: las proteínas de la yema del huevo. Conforme aumenta la temperatura, se produce la desnaturalización de estas macromoléculas (se rompen los enlaces que las mantenían plegadas). El despliegue de las cadenas permite que estas puedan entrelazarse, actuando como hidrocoloides, es decir, reteniendo agua. A partir de cierta temperatura crítica, los filamentos se unen cada vez con mayor fuerza y exprimen una parte importante del agua retenida. Cuando se produce esta coagulación intensa, aparecen grumos. (En una tortilla, las proteínas del huevo experimentan una coagulación intensa y uniforme.) En condiciones normales (yema sola), la coagulación empieza a los 70 ºC; en condiciones de fuerte dilución acuosa (crema), a los 80 ºC. Por tanto, si queremos impedir la aparición de los temidos grumos (coagulación intensa), deberemos evitar que la temperatura final de la crema sobrepase los 85 ºC.



JUANMONINO/ISTOCKPHOTO

Conseguir el punto de desnaturalización ideal, el que espesa pero no llega a producir grumos, es difícil. Pero no imposible. Según hemos comprobado en nuestro laboratorio, una buena fórmula (por litro de leche) consiste en mezclar primero una fracción de la leche fría (40 gramos) con el almidón (40 gramos); logramos así la dispersión de este. A continuación, incorporar las yemas y depositar la mezcla en un recipiente grande. A la leche restante se le añaden el azúcar y los aromatizantes. Se deja reposar, se calienta y se extraen los aromatizantes. Se hierve la leche hasta que la espuma casi rebose. En ese preciso momento, se vierte la leche a la mezcla de almidón y yemas, y se remueve rápidamente. Ya tenemos la crema perfecta.

La clave estriba en llegar a una temperatura final de entre 80 y 85 ºC. Al añadir el azúcar a la leche se produce en esta un aumento del punto de ebullición (aumento ebulloscópico, debido a la presencia de un soluto en un disolvente) que nos permite llegar al intervalo perfecto de temperatura y, a la vez, mantenernos alejados de la «zona» de formación de grumos. En este intervalo de temperaturas se produce la hidratación perfecta del almidón de maíz (el más utilizado para estas preparaciones) y la desnaturalización óptima de las proteínas de la yema del huevo. Además, la preparación puede considerarse pasteurizada, lo que permite conservarla en la nevera durante cierto tiempo.

En otro tipo de cremas, la coagulación viene determinada también por la acidez. Nos referimos a las cremas de frutas ácidas, que se preparan sin almidón (la proporción proteínica de la preparación se aumenta con huevos enteros). Esta sería una buena receta para un kilogramo de crema de limón: 360 gramos de zumo de limón, 230 gramos de huevos enteros, 200 de yemas y 210 de azúcar. Se mezclan los ingredientes; se calientan mientras se remueven hasta que la preparación espese. Dado que el zumo de limón es muy ácido, el *p*H de la preparación no pasa de 4. En estas condiciones, las proteínas del huevo se agrupan (espesan) a partir de los 70 ºC y no se producen grumos hasta temperaturas elevadas.

Curiosamente, las únicas cremas de fruta que preparan los cocineros profesionales son las de limón y fruta de la pasión. Las otras frutas, al ser menos ácidas, no permiten espesar la crema sin pasar directamente a la coagulación fuerte (grumos). En ese caso puede recurrirse a la acidificación con ácido cítrico, málico, ascórbico, etcétera. Si logramos mantener el *p*H por debajo de 4, obtendremos una textura de crema perfecta.

Pavel Kroupa es doctor por la Universidad de Cambridge. Actualmente dirige el grupo de trabajo «Poblaciones Estelares y Dinámica Estelar» del Instituto de Astronomía Argelander de Bonn. Su investigación se centra en la dinámica estelar y galáctica, y se propone estudiar en detalle las variantes de la dinámica newtoniana modificada.
Marcel Pawlowski realiza su doctorado en astrofísica en la Universidad de Bonn.



COSMOLOGÍA

Galaxias enanas y materia oscura

Observaciones recientes de las galaxias satélite de la Vía Láctea parecen contradecir las predicciones del modelo cosmológico estándar

Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski

El universo existe desde hace 13.700 millones de años. ¿Cómo ha adquirido la estructura a gran escala que exhibe hoy? ¿Qué fuerzas y formas de materia han desempeñado una función relevante en el proceso? La abundancia relativa de los elementos, la radiación de fondo cósmico de microondas, la expansión del universo... Las investigaciones relativas a todos estos fenómenos nos permiten suponer, por numerosas razones, que el cosmos se originó en la gran explosión. Desde entonces, ha sido sobre todo la fuerza de la gravedad la que ha dado forma a nuestro universo, estructurado en galaxias y cúmulos de galaxias.

El modelo cosmológico estándar, la teoría de la que los expertos se sirven para describir la evolución del universo, implica predicciones adicionales. Una de ellas afirma que las galaxias no se componen solo de la materia que podemos ver. Además de la materia bariónica (aquella de la que están hechas las estrellas, los planetas o los seres humanos), las galaxias contienen un ingrediente adicional: la materia oscura. Su papel no se reduce al de «la sal en la sopa», sino que debería dar cuenta de un 85 por ciento de toda la materia del universo. Hasta ahora, sin embargo, no se han detectado de manera directa partículas de materia oscura. Este objetivo se ha perseguido con insistencia, sobre todo en laboratorios subterráneos muy profundos, con resultados negativos. En la Estación Espacial Internacional se instalará un instrumento de 1500 millones de euros (el Espectrómetro Magnético Alpha) con el objetivo de proseguir la búsqueda.

Los astrónomos cuentan con muy buenas razones para postular la existencia de materia oscura. En las galaxias con forma de disco, las observaciones revelan que las estrellas más alejadas del centro rotan alrededor de este a mayor velocidad de la que predice la ley de la gravitación de Newton. En el cálculo ha de tenerse en cuenta la masa de toda la materia observable de la galaxia: la de las estrellas, el gas interestelar y el polvo cósmico. Las gráficas en las que se representa la velocidad de las estrellas frente a su distancia al centro de la galaxia se conocen como «curvas de rotación». Según los cálculos, la velocidad las estrellas en torno al centro de la galaxia debería disminuir de manera considerable para aquellos astros más alejados del centro galáctico. Deberían comportarse de manera análoga a como lo hacen los planetas más exteriores del sistema solar, los cua-

NASA/ESA, H. FORD (JHU), G. ILLINGWORTH (UCSC/LO), M. CLAMPIN (STSCI), G. HARTIG (STSCI) Y EQUIPO CIENTÍFICO ACS

EN SÍNTESIS

La materia oscura constituye una de las piedras angulares del modelo cosmológico estándar. Su existencia, sin embargo, aún no ha podido demostrarse de manera directa.

Según el modelo estándar, las propiedades de las galaxias enanas que rodean a las grandes galaxias deberían guardar una estrecha correlación con los halos de materia oscura.

Investigaciones recientes muestran discrepancias manifiestas entre las predicciones del modelo estándar y las observaciones. ¿Deberíamos tomar en serio las alternativas a la materia oscura?



Brazos de marea: En el larguísimo brazo de las galaxias de Los Ratones, en proceso de fusión, se originan unas pequeñas estructuras denominadas galaxias enanas de marea. Su mecanismo de formación podría describir con precisión el origen de las galaxias satélite de la Vía Láctea. La materia oscura, una de las características esenciales del modelo cosmológico estándar, no desempeñaría en dicha descripción ninguna función relevante.



La materia oscura, hecha visible: **Esta simulación muestra el halo de materia oscura que, de acuerdo con el modelo cosmológico estándar, envuelve la Vía Láctea (*centro*). La representación se basa en los cálculos realizados en 2008 por Jürg Dieman con ayuda de un superordenador. La cantidad descomunal de subhalos (*puntos blancos*) donde habrían de formarse galaxias satélite visibles se halla en desacuerdo manifiesto con las observaciones astronómicas: según estas, la Vía Láctea no cuenta con más que un par de docenas de galaxias satélite a su alrededor.**

JÜRG DIEMAND, MICHAEL KUHLEN, PIERO MADAU, MARCEL ZEMP, BEN MOORE, DOUG POTTER Y JOACHIM STADEL; CORTESÍA DE JÜRG DIEMAND, UNIVERSIDAD DE ZÚRICH

les giran alrededor del Sol mucho más despacio que, por ejemplo, Venus o la Tierra. Sin embargo, las observaciones muestran que, en las galaxias, las estrellas más externas rotan a mayor velocidad de lo debido. Además, y como consecuencia de la fuerza centrífuga, los sistemas estelares deberían disgregarse con relativa rapidez, fenómeno que tampoco concuerda con las observaciones.

UN CANDIDATO TRAS OTRO

La manera más sencilla de conciliar los cálculos teóricos con las observaciones pasa por suponer que se ha subestimado la masa de la galaxia. En un principio se consideraron numerosos candidatos para dar cuenta de la masa que faltaba: agujeros negros, estrellas de neutrones, enanas marrones o grandes cantidades de gas frío. Todos esos objetos pueden escapar con facilidad a las observaciones. Sin embargo, estudios más precisos fueron descartando una tras otra todas las posibilidades. Ello solo dejaba la sospecha de que debía existir un nuevo tipo de materia, hasta ahora inobservada: la materia oscura. Sus partículas se distinguirían por ser insensibles a la interacción electromagnética, por lo que no emitirían ni absorberían luz alguna y apenas interaccionarían con la materia bariónica. Por ello, no solo serían invisibles a las observaciones astronómicas, sino que también resultaría muy difícil detectarlas en el laboratorio. Pero, si existiesen en cantidad suficiente, sus efectos gravitatorios explicarían las curvas de rotación.

El modelo estándar de la física de partículas, el cual describe las propiedades de las partículas elementales, no contempla la existencia de partículas de materia oscura. ¿Un indicio de que quizá no existan? En el futuro, el modelo estándar podría ser reemplazado por otra teoría más completa, como la teoría de cuerdas. Muchos esperan que dicha teoría prediga la existencia de partículas de materia oscura, en cuyo caso aparecerían de manera natural como un componente más del universo.

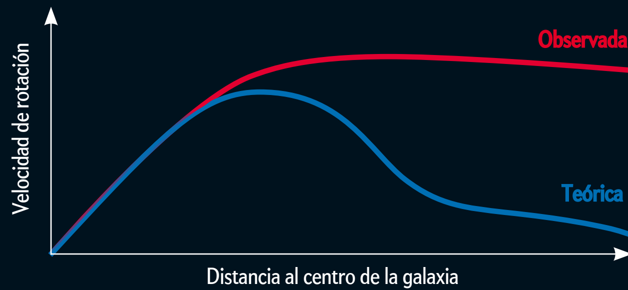
Lo que al principio emergió como una solución simple al problema de las curvas de rotación de las galaxias se convirtió, con el tiempo, en lo que hoy conocemos como modelo cosmológico estándar. Este constituye la teoría más completa de la que disponemos sobre el origen, la evolución y la composición del cosmos. Según él, las galaxias se encuentran formadas en su mayor parte por gigantescas concentraciones de materia oscura, denominadas «halos». En el centro de estas colosales acumulaciones de materia oscura, y solo allí, se hallaría la parte observable de la galaxia.

Numerosas simulaciones cosmológicas se basan de modo exclusivo en el comportamiento de la materia oscura, pues los efectos de la materia bariónica resultan ínfimos en comparación. En un principio, las partículas de materia oscura debían haberse repartido de manera uniforme por el cosmos, pero cuando el universo era aún muy joven comenzaron a agruparse en concentraciones esféricas. Así se habrían formado un gran número de halos menores, algunos de los cuales colisionaron con otros y dieron lugar a halos mayores. Después, estos habrían continuado engullendo halos enanos hasta convertirse en las gigantescas estructuras que se presumen hoy. Según los cálculos, la Vía Láctea habría necesitado unos 10^{10} halos de masa superior a la del Sol para llegar a adquirir su tamaño actual.

No obstante, según las simulaciones, esas estructuras de materia oscura aparecieron antes de lo que indican las observaciones. Ello indujo a introducir en el modelo estándar la energía oscura [*véase* «Energía oscura o vacío cósmico», por T. Clifton y P. G. Ferreira; Investigación y Ciencia, junio de 2009]. Esta misteriosa forma de energía frena el desarrollo de las estructuras de materia oscura, de tal modo que su distribución final sí se halla en acuerdo con las observaciones.

La energía oscura constituye otro postulado del modelo cosmológico estándar. A finales del siglo pasado se descubrió que el universo no solo se expandía, sino que lo hacía de manera acelerada. La explicación del fenómeno requería introducir una nueva forma de energía capaz de «estirar» el espacio mismo (y, con él, también la materia oscura). Esto, sin embargo, introduce otra dificultad: la energía del vacío de un universo que se expande de manera acelerada crece sin límite. Un principio fundamental de la física afirma que la energía total de todo sistema aislado ha de permanecer constante, por lo que, si admitimos la existencia de energía oscura, habríamos de considerar el universo como un sistema abierto.

Pero volvamos a la materia oscura. ¿Cómo se llenan los halos oscuros de gas bariónico, el que forma las estrellas y galaxias que observamos? Resulta difícil exagerar la importancia de esta pregunta. Todos los cálculos basados en el modelo estándar que dan lugar a procesos realistas de formación estelar indican que, en primer lugar, son los halos pequeños los que se llenan de gas y estrellas, y solo después lo hacen los halos mayores. Pero si la formación de las primeras estrellas da lugar a galaxias enanas, estas deberían ser más antiguas que sus hermanas mayores. Sin embargo, las observaciones indican justo lo contrario: las galaxias masivas se revelan claramente más viejas que las enanas.

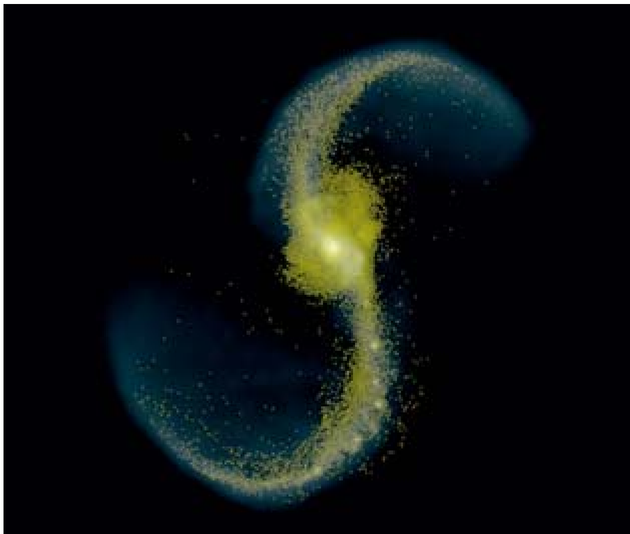


Curvas de rotación: La velocidad de giro de las estrellas en torno al centro galáctico depende de la distancia a la que se encuentran de dicho centro. Según las leyes de Newton, a partir de una determinada distancia la velocidad de rotación de las estrellas debería disminuir. Las observaciones, por el contrario, muestran que los astros más alejados giran a una velocidad mucho mayor que la esperada.

GALAXIAS AUSENTES

Existen otras contradicciones. El año pasado, Jim Peebles, de la Universidad de Princeton, y Adi Nusser, del Instituto Technion de Haifa, demostraron que la distribución de materia visible en el Volumen Local (la región de unos 24 millones de años luz de radio a la que pertenece la Vía Láctea) no se correspondía con las predicciones del modelo estándar.

Nosotros hemos puesto a prueba el modelo estándar a escalas aún menores. Según este, muchas galaxias —incluida la nuestra— habrían de componerse de un gran número de galaxias menores. El halo de materia oscura de la Vía Láctea mide en torno a un millón de años luz (diez veces más que la parte visible de la galaxia). De acuerdo con las simulaciones, en su interior deberían hallarse varios centenares o incluso un millar de halos menores, los cuales deberían contener, a su vez, pequeñas galaxias observables. A ello habría que añadir un número aún mayor de halos completamente oscuros.



Satélites y materia oscura: Si algunas galaxias satélite de la Vía Láctea fuesen en realidad galaxias enanas de marea, el problema de las «satélites ausentes» se agravaría aún más, ya que quedarían muy pocas satélites que pudieran deberse a la materia oscura. El modelo cosmológico estándar también predice el nacimiento de enanas de marea. Esta imagen, obtenida en una simulación que incluye los efectos de la materia oscura, muestra dos galaxias de marea en una fase final de la colisión. En ella puede apreciarse el bulbo central de la galaxia producto del choque (*centro*). Pero, sobre todo, destacan los pequeños puntos luminosos en el brazo inferior, que darán lugar a galaxias enanas de marea.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (*arriba*); CORTESÍA DE MARKUS WETZSTEIN (UNIVERSIDAD DE ZÚRICH) Y THORSTEN NAAB/MPA GARCHING (*abajo*)

El banco de pruebas más adecuado para detectar esos halos lo proporciona el Grupo Local. Con un diámetro de tres millones de años luz, constituye nuestra vecindad cósmica más próxima. Da cobijo a dos grandes galaxias espirales: la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda. Ambas viajan acompañadas de una pequeña corona de galaxias satélite que distan no más de 800.000 años luz y que giran en torno a la galaxia madre.

El Grupo Local permite realizar pruebas muy precisas, ya que, al contrario de lo que sucede con regiones más alejadas del universo, disponemos de observaciones muy detalladas. En particular, resulta posible comprobar con precisión las predicciones relativas a las propiedades y distribución de las galaxias satélite. Y es aquí donde encontramos toda una serie de discrepancias entre la teoría y las observaciones.

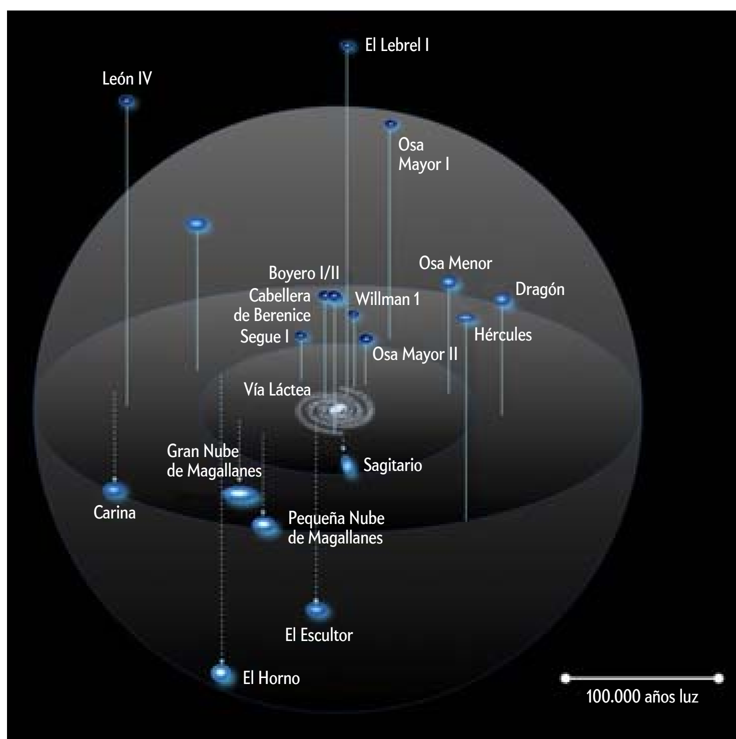
De acuerdo con el modelo estándar, las fusiones de halos de materia oscura pueden prolongarse durante miles de millones de años. Por tanto, en el interior de los grandes halos de materia oscura deberían encontrarse, a día de hoy, subhalos que aún no se han disuelto por completo en el halo principal. A su vez, esos subhalos deberían contener otros subhalos, y así sucesivamente. Todas estas aglomeraciones de materia oscura se mueven de manera desordenada a lo largo de trayectorias que cambian una y otra vez en torno a un centro común.

En particular, en torno a una galaxia del tamaño de la Vía Láctea deberían dar vueltas centenares o hasta un millar de halos de materia oscura. Sin embargo, hasta el presente no se conocen más que 24 galaxias satélite en nuestra vecindad galáctica. Tampoco se prevé que la cifra aumente de manera considerable a partir de observaciones más precisas. Esta discrepancia se conoce con el nombre de «el problema de las satélites ausentes». A fin de resolverlo, en un principio se modificaron los procesos físicos de las simulaciones: se representaron de una manera más realista y con mayor resolución. La esperanza residía en que simulaciones más detalladas redujesen las predicciones relativas al número de subhalos hasta cuadrarlas con las observaciones. Todos estos intentos fracasaron.

A fin de rescatar la teoría, se desarrollaron otras explicaciones. Una de ellas postulaba que las galaxias visibles quizá solo representasen la punta del iceberg: tal vez existiese una gran cantidad de halos de materia oscura, pero solo una pequeña fracción de ellos desarrollase en su interior estrellas o núcleos de gas visible.

LA PUNTA DEL ICEBERG

Cuanta menos masa posee un halo de materia oscura, tanto menor es su fuerza gravitatoria y, en consecuencia, su capacidad para ligar materia visible. Además, existen fuentes de energía, tanto internas como externas, que se contraponen a la atrac-



Compañía galáctica: Hasta el momento se han identificado 24 galaxias satélite enanas alrededor de la Vía Láctea (su escala aquí no es la correcta). Unas diez de ellas no fueron descubiertas hasta el siglo pasado. El número de galaxias enanas observadas es ínfimo en comparación con las predicciones del modelo cosmológico estándar. La figura no reproduce las descubiertas en fecha reciente ni las que se encuentran demasiado lejos: León I, León II, León V, El Lebrel I, Piscis I y Piscis II. Segue II (que tampoco se incluye) y Segue I no se han confirmado todavía».

Existen, además, otras discrepancias. Las galaxias de disco (aquellas caracterizadas por una distribución aplanada de estrellas) presentan a menudo un ensanchamiento elipsoidal en su centro. Esta región de mayor densidad de estrellas, similar a una galaxia elíptica y en la que las estrellas orbitan de manera desordenada en torno al centro, recibe el nombre de bulbo galáctico. Como cabría esperar, el bulbo ejerce una influencia considerable sobre el número de galaxias satélite que posee la galaxia madre. Para comprobarlo, basta con contar las galaxias satélite de cada una de las galaxias de disco más próximas a nosotros. Para reducir el riesgo de pasar alguna por alto, solo se toman en cuenta las satélites con una luminosidad de al menos 200.000 veces la del Sol. La galaxia de Andrómeda, que exhibe un bulbo de gran masa, se halla rodeada por 16 de tales galaxias satélite. El bulbo de la Vía Láctea, con una masa algo superior a la mitad que el de Andrómeda, cuenta con 9 satélites del tipo considerado. En torno a M33, bastante pequeña y sin bulbo, no se ha observado ninguna galaxia satélite de esta clase. Este pequeño examen muestra, de manera muy clara, que cuanto más masivo es el bulbo galáctico, más satélites rodean a la galaxia madre. (Hasta el momento solo hemos podido comprobar la relación en estas tres galaxias del Grupo Local, ya que solo aquí resulta posible identificar con seguridad las galaxias satélite.)

Desde el punto de vista de la cosmología estándar, una correlación de este tipo resulta muy improbable: las galaxias con halos muy masivos siempre se originarían a partir de la agregación de muchos subhalos, lo que debería originar un mayor número de galaxias satélite. Sin embargo, se han descubierto galaxias de disco con y sin bulbo cuyas curvas de rotación muestran grandes semejanzas. Pero, en un modelo con materia oscura, curvas de rotación similares implican halos de masa parecida y, en consecuencia, un número semejante de subhalos. En consecuencia, no debería existir ninguna correlación entre el número de galaxias satélite y la masa del bulbo de una galaxia de disco. Un resultado que contradice por completo las observaciones llevadas a cabo en el Grupo Local.

ción gravitatoria. Si en un halo de materia oscura se encuentra ya una galaxia enana, las estrellas calientan el gas y este se expande. El mismo efecto lo originan también radiaciones ionizantes provenientes del exterior. Los halos oscuros de poca masa, por tanto, no retendrían el gas y en su interior no nacerían estrellas. Las fuerzas de marea también podrían limitar el desarrollo de halos satélite.

Pero, si solo viéramos una fracción mínima de la distribución total de galaxias satélite, las galaxias enanas deberían pertenecer a subhalos oscuros de gran masa, ya que solo estos ejercerían una fuerza gravitatoria lo bastante intensa como para ligar materia visible. Por tanto, cuanta más materia bariónica acumula un halo, más masivo debería ser este. Podemos afirmar que la cosmología estándar predice una relación clara entre la masa de los halos oscuros y la luminosidad de las galaxias enanas que contienen en su interior. Esta predicción ha quedado confirmada por numerosos cálculos que incluyen los efectos de las fuentes de energía internas y externas que mencionábamos arriba.

¿Qué resultado arrojan las observaciones? Todas las galaxias satélite de la Vía Láctea (la mayoría, 16, en el hemisferio norte galáctico) contienen una cantidad muy similar de materia oscura: cada una, unos mil millones de masas solares. Sus luminosidades, sin embargo, varían entre el millar y los diez millones de veces la luminosidad del Sol. El resultado contradice por completo la predicción de la cosmología estándar.

¿DISTRIBUCIONES UNIFORMES?

Examinemos ahora la distribución espacial de las galaxias satélite y sus órbitas. Según la cosmología estándar, durante el proceso de acreción las galaxias enanas caen desde todas direcciones hacia un enorme halo de materia oscura. Incluso las estructuras cósmicas más simples que se han observado, como filamentos o pequeños grupos de galaxias enanas, se extienden a lo largo de más de 600.000 años luz, una distancia varias veces mayor que el diámetro de la Vía Láctea. Por tanto, las galaxias satélite habrían de repartirse de manera uniforme por el halo de la Vía Láctea.

Pero la distribución espacial de las galaxias satélite conocidas muestra una estructura muy clara: todas ellas se disponen sobre un disco perpendicular al plano galáctico. El grosor del disco asciende a unos 150.000 años luz y su diámetro es de 1,5 millones de años luz. En 2005, uno de nosotros (Kroupa), junto con Christian Theis, entonces en la Universidad de Kiel, y Christian Boily, del Observatorio Astronómico de Estrasburgo, empezamos a investigar el asunto. Desde entonces, se ha

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/MARLA GEHA, UNIVERSIDAD DE YALE; CORTESÍA DE MARLA GEHA

En busca de las galaxias perdidas

¿Existe la materia oscura?
La respuesta depende en gran parte del número de galaxias satélite de la Vía Láctea, pues, según el modelo cosmológico estándar con materia oscura, debería haber muchas más de las que vemos. Hasta ahora solo se ha podido investigar con precisión el hemisferio norte galáctico. Uno de los objetivos principales del Sondeo Stromlo de Satélites de la Vía Láctea (SMS), en Australia, consiste en sondear con profusión el hemisferio sur.

¿Qué cabe esperar?
Si se comprueba que las galaxias satélite del hemisferio sur también se distribuyen sobre un disco (como ya se ha visto que ocurre con las 16 del hemisferio norte y las 8 del hemisferio sur), la cosmología estándar se vería en serios problemas. Por razones de simetría, cabe esperar que el proyecto SMS logre descubrir al menos otras 8 galaxias satélite. En cualquier teoría que pretenda dar cuenta del fenómeno, una asimetría norte-sur resulta del todo improbable.

Tecnología galáctica
El instrumento del proyecto SMS es el SkyMapper («cartógrafo celeste»), un telescopio robótico cuyo coste asciende a unos ocho millones de euros. De 1,35 metros, el telescopio, se encuentra en el Observatorio de Siding-Spring de la Universidad Nacional Australiana. Una cámara CCD de 268 megapíxeles y gran amplitud de campo (5,7 grados cuadrados) proporcionará los datos más precisos hasta ahora sobre la estructura del cielo del hemisferio sur. El grupo de trabajo de los autores participará en el análisis de datos y se prevé que, en el futuro, también en las observaciones.

comprobado que incluso las galaxias satélite de muy baja luminosidad también se disponen sobre el mismo disco.

Pero aún hay más. A partir de los espectros de las galaxias satélite pueden obtenerse sus velocidades radiales. Una toma de imágenes continuada durante varios años permite, además, calcular otras dos componentes del movimiento y sus velocidades individuales (siempre y cuando se muevan con rapidez suficiente y se encuentren lo bastante cerca de nosotros). En el caso de algunas de las satélites más próximas, conocemos incluso la dirección en la que orbitan en torno a la Vía Láctea. Siete de las ocho satélites cuyo sentido de giro se ha podido determinar se mueven en el plano del disco, y seis de ellas giran incluso en el mismo sentido. Solamente una, la galaxia del Escultor, se desplaza en sentido contrario.

El resultado constituye toda una sorpresa en el contexto de la cosmología estándar, la cual no puede explicar por qué las satélites habrían de distribuirse en un disco, ni mucho menos por qué la mayoría debería girar en un mismo sentido. Un comportamiento así resulta tan improbable que no deja lugar a la casualidad. De hecho, nos permite aventurar que, en la galaxia de Andrómeda, se observará una ordenación similar en sus galaxias satélite.

RESTOS DE COLISIONES

Vemos por tanto que, si consideramos las galaxias satélite de la Vía Láctea como materia bariónica emplazada en el interior de subhalos de materia oscura, nos topamos con toda una serie de dificultades. ¿Existe alguna descripción alternativa? Ya en 1976, cuando la hipótesis de la materia oscura no gozaba aún de una aceptación generalizada, Donald Lynden-Bell, astrofísico de la Universidad de Cambridge, sugirió que podía tratarse de galaxias enanas de marea.

Ese tipo de objetos aparecen cuando dos galaxias ricas en gas pasan muy cerca una de otra (encuentros mucho más frecuentes que las colisiones frontales de dos galaxias). Ello provoca que la fuerza de gravedad las frene y ambas comiencen a rotar en torno a un centro común. En la región en la que las galaxias se hallan enfrentadas, la atracción gravitatoria es mucho más intensa que en el lado opuesto de cada galaxia. A ello hay que añadir enormes fuerzas centrífugas que desgarran las galaxias y que hacen aparecer en cada una de ellas dos brazos curvados, que reciben el nombre de brazos de marea. Los dos brazos internos se juntan, mientras que los dos externos se alejan del lugar de la colisión.

Estos brazos pueden extenderse cientos de miles de años luz; es decir, mucho más que los diámetros de las galaxias. Están formados por estrellas, gas y polvo. Estos materiales pueden agregarse, lo que al final origina el nacimiento de nuevas estrellas. De este modo, de la «chatarra» expulsada durante la colisión, aparecen poco a poco grandes formaciones estelares. El proceso culmina en la formación de otras galaxias en los brazos de marea. Estas galaxias se alinean a lo largo del brazo de marea, por lo que toman direcciones de movimiento parecidas. Además, se encuentran sobre el plano de interacción entre las dos grandes galaxias, donde las fuerzas son más intensas. Nuestros cálculos por ordenador muestran que, en este caso, puede aparecer con facilidad alguna «galaxia fantasma» que se desplaza en sentido contrario.



CORTESÍA DE OLIVIER TIRET (SISSA)

Gravedad modificada: Simular una colisión entre galaxias de disco no requiere postular la existencia de materia oscura. Esta simulación, realizada en 2008 por Olivier Tiret, ahora en la Escuela de Estudios Avanzados de Trieste, y Françoise Combes, del Observatorio de París, consiguió reproducir, en acuerdo con las observaciones, la extensión de los brazos de marea y la formación de galaxias enanas a partir de una dinámica no newtoniana. Simulaciones de este tipo resultan más complicadas que las correspondientes a cálculos newtonianos, por lo que hasta ahora solo se han conseguido realizar a baja resolución.

OBJECIONES

Cuestión de escala

Numerosos investigadores descartan la posibilidad de poner a prueba el modelo cosmológico estándar a escalas pequeñas: los procesos físicos en los que interviene la materia bariónica (como los de formación estelar y otros) serían demasiado complejos como para que las simulaciones pudiesen precisarlos con detalle. Sin embargo, todas las consecuencias del modelo cosmológico estándar a las que hace referencia este artículo se apoyan en principios universales, como el de conservación de la energía o el momento angular, y en ningún caso en los detalles de la física de la materia bariónica.

Considerar las galaxias satélite de la Vía Láctea como galaxias enanas de marea proporciona una explicación convincente de su distribución espacial y sus direcciones de desplazamiento. La colisión que las originó debió de haberse producido, de acuerdo con nuestros cálculos, hace unos once mil millones de años. En aquella época, el universo era mucho menor y más denso que ahora, por lo que las colisiones entre galaxias sucedían con mayor frecuencia. Gracias a su elevado contenido en gas, disponían de muchísimo más material para formar brazos de marea y nuevas galaxias.

La hipótesis de las galaxias de marea aclara, además, otras observaciones. Cuanto mayores sean los sistemas estelares que colisionan, más galaxias de marea se espera que aparezcan. Por otra parte, y dado que el bulbo galáctico puede explicarse como un producto de la colisión entre galaxias, cabe esperar que el bulbo sea tanto más masivo cuanto mayores fuesen las galaxias que chocaron. Ello ofrece una explicación plausible a la relación que hemos observado en el Grupo Local entre la masa del bulbo y el número de galaxias satélite. Ambos fenómenos dependen de la misma manera de las interacciones entre galaxias durante la colisión. Si, por el contrario, una galaxia nace en ausencia de colisiones importantes, carecería de bulbo y de galaxias satélite. Ese parece ser el caso de M33.

Desde luego, la cosmología estándar describe las colisiones entre galaxias, que también en este marco teórico aparecen como el principal responsable del crecimiento de los sistemas estelares. En el año 2000, Tadashi Okazaki y Yoshiaki Taniguchi, de la Universidad de Tohoku, demostraron que, en el contexto de la cosmología estándar, el fenómeno de las galaxias de marea basta por sí solo para explicar el número observado de galaxias satélite, así como el número de galaxias enanas elípticas presentes en los cúmulos de galaxias. Por tanto, la propia cosmología estándar no deja lugar para más galaxias enanas; en particular, tampoco para aquellas originadas por halos de materia oscura.

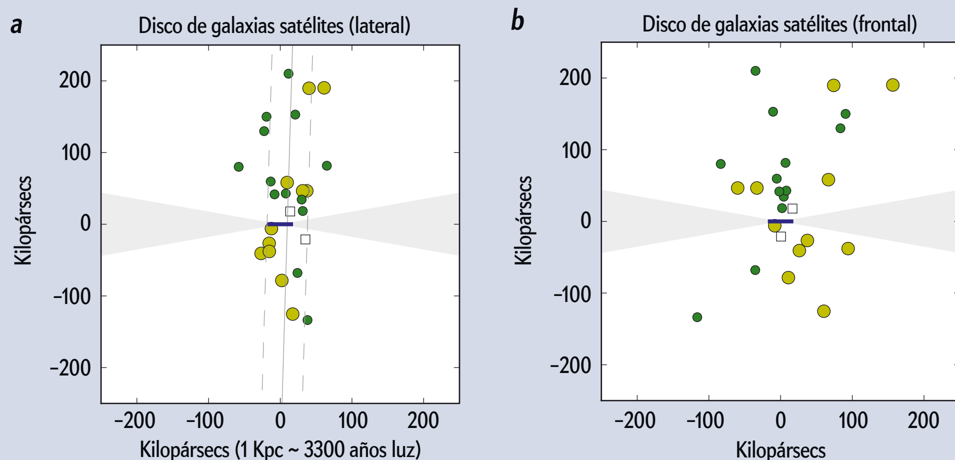
Durante los próximos años, diversos experimentos (como el Sondeo Stromlo, en Australia, o la misión espacial Gaia, de la Agencia Espacial Europea) verificarán si la mayor parte de las galaxias satélite de la Vía Láctea se mueven en un disco. De ser el caso, se trataría con toda probabilidad de enanas de marea y, en contra de las predicciones de la cosmología estándar, no habría lugar para galaxias satélite de materia oscura.

¿QUÉ QUEDA DE LA MATERIA OSCURA?

Aún resta otra cuestión fundamental por aclarar. Las estrellas de las galaxias satélite también giran en torno a su centro a mucha mayor velocidad que la que cabría esperar. Parece pues que, al igual que las galaxias mayores, las satélites de la Vía Láctea deberían contener una enorme proporción de materia oscura para permanecer estables y no disgregarse por efecto de la fuerza centrífuga. Ello nos induce a pensar que, al fin y al cabo, seguimos necesitando la materia oscura.

Para responder a esta pregunta, ayuda echar un vistazo a las galaxias enanas aún jóvenes de la galaxia madre NGC 5291, situada a unos 200 millones de años luz de distancia. Estas también deberían ser galaxias enanas de marea, ya que el brazo de

MARCEL PAWLOWSKI



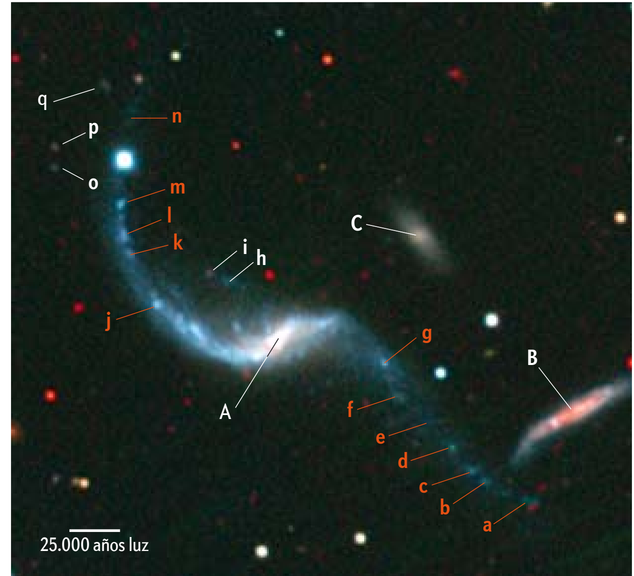
Disco de galaxias: Las galaxias satélite de la Vía Láctea se reparten sobre un disco perpendicular al plano de nuestra galaxia. El primer diagrama (*a*) muestra el disco visto de canto. El segundo (*b*) proporciona una perspectiva del plano del disco superior. Ese plano se representa con una línea continua; las líneas discontinuas indican su grosor. El pequeño segmento central se corresponde con el plano galáctico de la Vía Láctea (su diámetro es menor que el grosor del disco de las satélites). Los 11 puntos amarillos corresponden a las galaxias satélite más brillantes, conocidas desde hace tiempo. Las 13 menos brillantes, descubiertas hace poco, se representan en verde. Los cuadrados simbolizan sendos objetos que aún no han sido completamente identificados. Los conos grises indican la región espacial inaccesible a las observaciones, por hallarse ocultada por nuestra propia galaxia.

Galaxias enanas de marea

La galaxia del Renacuajo (UGC 10214, *izquierda*), se encuentra a 420 millones de años luz de la Vía Láctea. Su largo brazo de marea, con una longitud de 280.000 años luz, acoge toda una serie de cúmulos estelares, cada uno con varios cientos de miles de estrellas nuevas, algunas de ellas de gran masa. Al encontrarse mucho más calientes que el Sol, emiten una luz muy azul. Las simulaciones numéricas llevadas a cabo por el grupo de trabajo de los autores predicen que, con el tiempo, esos cúmulos estelares darán lugar a galaxias enanas de marea.

La agrupación conocida como «Silla de Dentista» (su nombre oficial es AM 1353-272, *derecha*) se compone de tres sistemas estelares en interacción. La galaxia más llamativa (*A*) se caracteriza por dos brazos de marea, cada uno de unos 100.000 años luz de longitud. En ellos se han encontrado numerosos candidatos a futuras galaxias enanas de marea (*letras minúsculas rojas*). Algunos objetos no han podido aún ser identificados (*letra minúsculas blancas*). Además, la agrupación incluye una galaxia de disco (*B*) y un sistema estelar elíptico (*C*).





NASA/ESA, H. FORD (JHU), G. ILLINGWORTH (UCSC/LO), M. CLAMPIN (STSCI), G. HARTIG (STSCI) Y EQUIPO CIENTÍFICO ACS (*galaxia del Renacuajo*); PETER WEILBACHER (AIP), PIERRE-ALAIN DUC (CNRS/CEA) Y ESO; CORTESÍA DE PETER WEILBACHER; ROTULADOS: *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*, SEGÚN PETER WEILBACH (*«Silla de Dentita»*).

marea donde se originaron resulta todavía visible. Pero, para mantenerse estables en sus órbitas, también requieren la presencia de materia oscura, como ya demostrara en 2007 Frédéric Bournaud, de la Universidad Paris Diderot, a partir de las curvas de rotación.

En 1992, sin embargo, Joshua Barnes y Lars Hernquist demostraron en un artículo publicado en *Nature* que los brazos de marea contienen, en comparación, muy poca materia oscura. Esta se comporta de manera bien distinta a materia la visible: en lugar de distribuirse en un delgado disco en rotación, se extiende de manera uniforme a lo largo de enormes distancias en torno a las galaxias que interaccionan. Por tanto, no resulta nada fácil encontrarla allí donde vemos los brazos de marea.

A diferencia de lo que sucede con las nubes de gas y de polvo, la materia oscura no se aglomera en estas regiones. (Cuando un gas de bariones se comprime, los átomos pueden radiar la energía, enfriarse y permanecer agregados. La materia oscura, por el contrario, no interacciona electromagnéticamente, por lo que no puede radiar la energía de este modo; si la presión aumenta, las partículas tienden a expandirse.) Así pues, aunque parece muy probable que las galaxias enanas de marea no contengan cantidades significativas de materia oscura, las observaciones muestran que sobre ellas actúan fuerzas gravitatorias que no pueden explicarse a partir de la materia visible. ¿Qué fuerza mantiene entonces unidas a las galaxias?

La cosmología estándar (y la hipótesis de materia oscura) asume que la relatividad general de Einstein sigue siendo válida a escalas cosmológicas. Eso va más allá del dominio en el que la teoría ha sido verificada experimentalmente. Además, dado que las consecuencias que se siguen de postular la existencia de materia oscura contradicen las observaciones, cabe deducir que la relatividad general quizá no sea válida a estas escalas. La paradoja acarrea importantes consecuencias para nuestra comprensión de la gravedad, interacción que a día de hoy seguimos sin comprender por completo. Según Einstein, la gravitación no debe interpretarse como una fuerza más, sino como la curvatura del espaciotiempo. Las otras tres fuerzas fundamentales de la naturaleza se dejan explicar mediante el intercambio de partículas mediadoras; la teoría de Einstein no admite, por el momento, una explicación de este tipo.

UN VACÍO DE CONOCIMIENTO

Hasta ahora, la física teórica moderna desconoce la verdadera relación entre masa y espaciotiempo. Aún permanece sin respuesta la importante pregunta sobre si el espaciotiempo surge como consecuencia de la existencia de materia o si, en realidad, podría existir de manera independiente. No es de extrañar, por tanto, que la astronomía revele un vacío de conocimiento en lo que a la gravitación se refiere.

Las contradicciones que acabamos de mencionar entre el modelo cosmológico estándar y las observaciones permiten aventurar que necesitamos una nueva teoría para describir los fenómenos gravitacionales a escalas cosmológicas. Esta alternativa resulta, desde un punto de vista conceptual, incluso más senci-

¿Hay varias corrientes de satélites?

Nuevos datos

Desde 2012 hasta 2017, la misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea y cuyo coste asciende a unos 500 millones de euros, estudiará en detalle el uno por ciento de las estrellas de la Vía Láctea e incluso algunas de la galaxia de Andrómeda. La exploración se extenderá sobre diversos tipos y clases de estrellas. Sus posiciones y, sobre todo, las velocidades a las que se mueven a través de la galaxia se obtendrán con finísima precisión gracias al satélite, que también analizará la luminosidad de los astros en los diferentes regímenes espectrales.

Rastreo de satélites

La misión Gaia determinará, además, las velocidades de las galaxias satélite en torno a la Vía Láctea. Se espera que lo haga con una precisión de unas decenas de kilómetros por segundo y en las tres dimensiones. Quizá logre resolver también la estructura fina de sus movimientos a través del disco de galaxias satélite. Si se comprobase que las satélites se originaron no a partir de uno, sino de dos brazos de marea, cabría la posibilidad de que existiesen dos corrientes de galaxias. Ambas se hallarían muy próximas en el disco que las contiene.

Teorías alternativas

Si en lugar del modelo cosmológico estándar se consideran teorías alternativas, como la dinámica newtoniana modificada (MOND) que describimos en este artículo, pueden formularse predicciones adicionales. Simulaciones numéricas recientes muestran que, cuando era muy joven, la Vía Láctea colisionó con otra galaxia al menos una vez, o quizá varias, antes de que ambas se fusionasen en una sola. Si este fue el caso, Gaia podría descubrir varias generaciones de galaxias satélite y, con ello, también varios planos con discos, si bien estos habrían adoptado orientaciones similares. El equipo de investigación de los autores trabaja en este tipo de modelos de la Vía Láctea primitiva. Más adelante, espera poder comparar sus resultados con los datos obtenidos por la misión Gaia.

lla que la hipótesis de la materia oscura. El modelo estándar de partículas elementales podría conservar su validez, al no tener que dar cuenta de la existencia de partículas de materia oscura. En las galaxias tampoco faltaría nada: la materia visible bastaría para explicar una fuerza gravitatoria más intensa que la que predicen las teorías actuales.

Numerosas investigaciones llevadas a cabo en los últimos años han mostrado que las propiedades de las galaxias, como las irregularidades de sus curvas de rotación, parecen depender de manera exclusiva de la distribución de la materia visible. Por tanto, de existir la materia oscura, esta debería, de una manera casi mágica, hallarse perfectamente acoplada con la visible.

Las verificaciones empíricas que, con enorme precisión, han validado la relatividad general de Einstein no contradicen lo que hemos dicho hasta ahora. Todos esos experimentos se han llevado a cabo a escalas mucho menores que las que intervienen en los procesos galácticos. En otras palabras, nada ha demostrado que las leyes de la gravitación de las que disponemos hayan de seguir siendo válidas a escalas cósmicas. El hecho de que la distribución espacial de materia a gran escala se halle en acuerdo con la relatividad general no constituye una prueba definitiva. Para demostrar una teoría científica no basta con apoyarse solo en primeros principios, sino que se requieren también comprobaciones experimentales rigurosas.

Aunque a día de hoy no existe una formulación concreta y aceptada por la mayoría sobre una teoría de la gravitación modificada, ya han aparecido algunas candidatas. La más conocida, la «dinámica newtoniana modificada» (MOND), ha recibido una atención creciente. Esta teoría fue formulada en 1983 por Mordehai Milgrom, del Instituto Científico Weizmann de Rehovot [*véase* «¿Existe realmente la materia oscura?», por Mordehai Milgrom; Investigación y Ciencia, octubre de 2002]. La propuesta se basa en una modificación de la segunda ley de Newton. Según Milgrom, para aceleraciones por debajo de cierto umbral, aparecerían discrepancias con respecto a las predicciones newtonianas.

A partir de las curvas de rotación de las galaxias, se ha determinado que el orden de magnitud de ese umbral es de 10^{-10} m/s^2. (La aceleración experimentada sobre la superficie terrestre a causa del campo gravitatorio resulta cien mil millones de veces mayor.) El origen de la desviación podría deberse a procesos cuánticos o bien a la existencia de campos adicionales todavía desconocidos. Tales efectos podrían contribuir a las perturbaciones que, según la relatividad general, induce en el espaciotiempo la presencia de cualquier masa.

John Moffat, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario, ha propuesto otra modificación de la gravedad (MOG), la cual se basa en añadir, cuando el campo es muy débil, una fuerza adicional a la gravitatoria. Esta se asemeja a la llamada interacción de Yukawa, que juega un papel importante en física nuclear. Tal vez no haya que modificar en absoluto la relatividad general. Es posible que existan efectos adicionales en el espaciotiempo que no hayan sido tenidos en cuenta de la manera correcta, y que quizá pudieran curvar ligeramente el espacio en presencia de campos gravitatorios muy poco intensos.

Los diferentes intentos para explicar las anomalías gravitacionales observadas en las galaxias constituyen hoy día el objeto de un intenso debate. El próximo decenio promete ser muy apasionante al respecto. Nada se ha decidido aún, pero hay algo que sí podemos afirmar con seguridad: la verdadera historia del universo está todavía por escribir.

PARA SABER MÁS

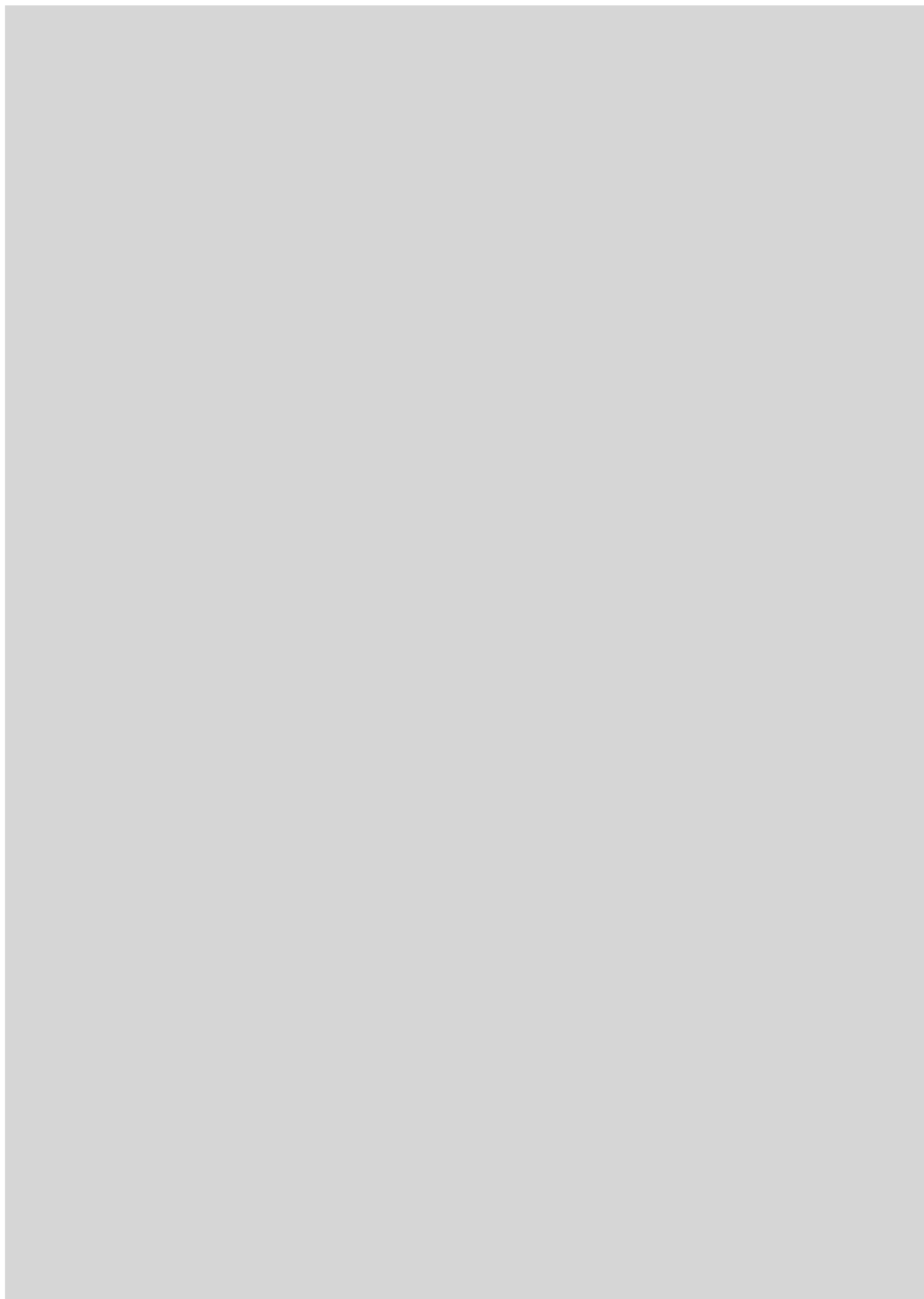
Missing mass in collisional debris from galaxies. F. Bournaud et al. en *Science*, vol. 316, n.º 5828, págs. 1166-1169, 25 de mayo de 2007.

Evolution of spiral galaxies in modified gravity. O. Tiret y F. Combes en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 464, n.º 2, págs. 517-528, 2007. Disponible en **arxiv.org/abs/astro-ph/0701011**

Tidal dwarf galaxies as a test of fundamental physics. G. Gentile et al. en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 472, n.º 2, págs. L25-L28, 2007. Disponible en **arxiv.org/abs/0706.1976**

Nearby galaxies and problems of structure formation: A review. P. J. E. Peebles y A. Nusser en *Nature*, vol. 465, n.º 7298, págs. 565-569, 3 de junio de 2010. Versión disponible en **arxiv.org/abs/1001.1484**

Local Group tests of dark matter concordance cosmology: Towards a new paradigm for structure formation. P. Kroupa et al. en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 523, art. n.º A32, 15 de noviembre de 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/1006.1647**



Ricardo López Ruiz y **Carmen Pellicer Lostao** son profesores de informática e ingeniería de sistemas de la Universidad de Zaragoza y pertenecen al Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos de la Universidad de Zaragoza. Sus intereses se centran en la dinámica no lineal y los sistemas complejos; en particular, en la complejidad estadística, la criptografía caótica y la econofísica.



ECONOFÍSICA

Modelos matemáticos de la riqueza

La física de los gases arroja luz sobre la distribución de la riqueza en las sociedades capitalistas modernas

Ricardo López Ruiz y Carmen Pellicer Lostao

Nos guste o no, la economía rige numerosos aspectos de nuestra vida personal y social. Por ello, siempre ha existido un gran interés por entender sus procesos mediante modelos que permitan explicar y predecir su comportamiento. Pero los sistemas económicos no se dejan modelizar con facilidad: las interacciones económicas entre los individuos de una sociedad son extremadamente numerosas y variadas, y pueden afectar a ámbitos tan dispares como el doméstico, el nacional o el internacional, y a escalas de tiempo muy dispares. Estas dificultades volvieron a quedar patentes tras el estallido de la crisis financiera en 2008. La imposibilidad de predecirla y de estimar el alcance de sus efectos puso de manifiesto, una vez más, la insuficiencia de nuestros modelos matemáticos de la economía.

Un buen número de fenómenos económicos responde a lo que en física se conoce bajo el nombre de dinámica no lineal o dinámica de sistemas complejos: sistemas cuyo comportamiento colectivo no se puede explicar a partir de la simple superposición de sus partes constituyentes. Por ejemplo, son

EN SÍNTESIS

La econofísica recurre a métodos de la mecánica estadística y la física de sistemas complejos para modelizar los sistemas económicos.

Los modelos de tipo gas intentan explicar algunas propiedades de las transacciones económicas entre los agentes de una sociedad a partir de los mismos modelos que describen las interacciones entre las partículas de un gas.

Al introducir parámetros procedentes de una dinámica caótica, dichos modelos logran reproducir la transición entre las diferentes distribuciones de riqueza que se observan en las sociedades capitalistas modernas.

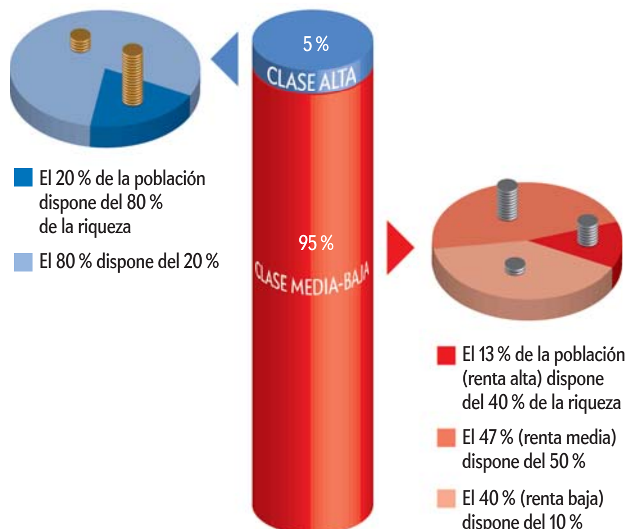
ISTOCKPHOTO/ANDREY VOLODIN

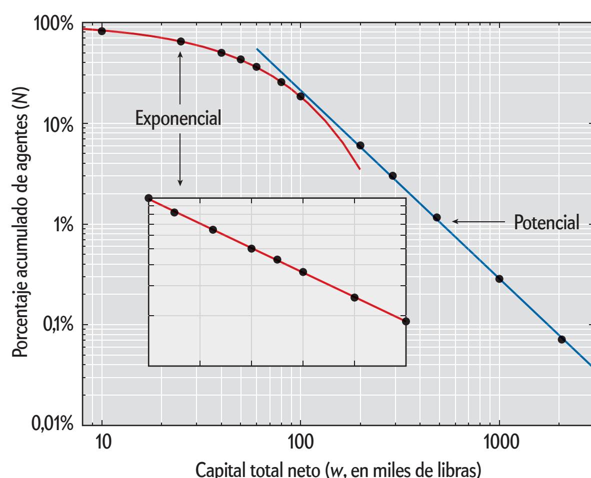

1.850
1.600
1.450

Clases medias y clases privilegiadas

En las sociedades capitalistas modernas existen dos grupos bien diferenciados. En torno al 95 por ciento de la población (las clases medias y bajas) se reparte los bienes según una distribución exponencial. Ello significa que, si la renta media de ese sector de la población es w_0, la probabilidad de que un individuo posea una renta *w* es proporcional a $\exp(-w/w_0)$. Por su parte, las clases privilegiadas se reparten los bienes según una distribución potencial: la probabilidad de que un individuo posea cierta renta *w* es proporcional a $1/w^p$, donde *p* es una constante positiva (*abajo*).

Los repartos exponenciales resultan mucho más equitativos que los potenciales (*derecha*). Aunque las clases privilegiadas son minoría y acumulan mucha más renta media por individuo que las clases medias o altas, el reparto que hacen entre sí del dinero que poseen sigue la «regla del 80-20»: el 20 % acumula el 80 % de dicha riqueza, y viceversa. En un reparto exponencial también se dan desigualdades, pero mucho menos acusadas. Además, casi la mitad de la población (aquellos individuos cuya renta se acerca más a la renta media) acumula la mitad de los bienes.





Reparto de bienes en el Reino Unido en el año 1996: En el eje de abscisas se representa la renta (*w*) en escala logarítmica; en el de ordenadas, una escala logarítmica del porcentaje de la población (*N*) cuya renta es igual o superior a cierto valor. Obsérvese que para el 95 por ciento de la población, la curva es exponencial: $N(w) \sim \exp(-w)$, o $\log N(w) \sim -\exp(\log w)$. La gráfica interior representa la misma distribución en escala logarítmica frente a lineal ($\log N(w) \sim -w$). En cambio, para el 5 por ciento restante (las rentas más altas), la ley es potencial: $N(w) \sim 1/w^p$, o $\log N(w) \sim -p \log w$ (*p* es una constante positiva dependiente del modelo).

A PARTIR DE: «EXPONENTIAL AND POWER-LAW DISTRIBUTIONS OF WEALTH AND INCOME IN THE UK AND THE USA», A. DRĂGULESCU Y V. M. YAKOVENKO EN *PHYSICA A*, VOL. 299, PÁGS. 213-221, 2001 (*gráfica*)

sistemas complejos aquellos que describen situaciones muy alejadas del equilibrio o los que exhiben comportamientos caóticos. Cabe preguntarse, por tanto, si es posible emplear métodos de física estadística para desarrollar modelos económicos realistas y eficientes. En los últimos años, este novedoso enfoque interdisciplinar, al que hemos dado en llamar econofísica, ha mejorado de manera considerable nuestra comprensión de los procesos económicos.

En este artículo nos centraremos en los denominados modelos de tipo gas. Estos intentan describir las interacciones económicas a partir de la analogía con uno de los sistemas físicos más sencillos que se conocen: un gas de partículas. A primera vista, la opción puede parecer descabellada. ¿Qué nos lleva a proponer semejante modelo para las interacciones económicas? La correspondencia entre ambos sistemas se establece en los siguientes términos: postularemos que los agentes económicos intercambian dinero o riqueza en sus transacciones comerciales de la misma forma en que las partículas en un gas intercambian energía en los choques. Y, al igual que los diferentes modelos de interacciones en un gas determinan sus propiedades, al considerar diversos tipos de transacciones económicas deberíamos recuperar distribuciones de riqueza distintas.

De cualquier manera, siempre podríamos objetar que los agentes económicos actúan movidos por cierta previsión e intencionalidad en sus decisiones de compraventa, características de las que carecen las partículas en un gas. Sin embargo, a lo largo de los últimos años se ha demostrado que los modelos de tipo gas consiguen reproducir algunos de los patrones observados en los sistemas económicos capitalistas. En particular, mediante modelos sencillos de intercambio de dinero que incluyen componentes aleatorios, caóticos, o ambos, resulta posible explicar de manera cualitativa la distribución de riqueza de las sociedades occidentales.

DISTRIBUCIONES DE RIQUEZA

En primer lugar, debemos preguntarnos por los patrones que describen el reparto de bienes entre los individuos de una sociedad. Ya en el año 1906, Vilfredo Pareto, ingeniero, economista y sociólogo italiano, se planteó la misma pregunta. Pareto llegó a la conclusión de que el reparto de bienes de su sociedad se ajustaba a la «regla del 80-20»: mientras que el 80 % de la población se repartía el 20 % de la riqueza total, el 20 % restante disfrutaba del 80 % de los bienes. Pareto observó que semejante distribución no solo reproducía el reparto de tierras en la Italia de su época, sino que también se advertía en otros ámbitos. Por ejemplo, había observado que el 20 % de las vainas de guisantes de su jardín proporcionaban el 80 % de la cosecha.

¿Es así la distribución de riqueza en nuestras economías? No exactamente. Hoy en día sabemos que, en las sociedades capitalistas modernas, existen dos grupos bien diferenciados. Por un lado, alrededor del 95 % de la población (las clases medias y bajas) se reparten los bienes según una distribución exponen-

cial. Por otro, el 5 % restante (las rentas privilegiadas) distribuye su riqueza según una distribución potencial (*véase el recuadro* «Clases medias y clases privilegiadas»).

Una distribución exponencial de bienes significa que la probabilidad de que un agente posea una renta determinada viene dada por una función exponencial de dicha renta. Supongamos que el salario medio de ese 95 % de la población asciende a 1500 euros mensuales. Denominemos «rentas bajas» a aquellas inferiores a 750 euros, «rentas medias» a las situadas entre 750 y 3000 euros, y «rentas altas» a las que superan los 3000 euros mensuales. Una distribución exponencial implica que un 40 % de la población es de renta baja y se reparte el 10 % de la masa salarial; el 47 % cuenta con una renta media y se distribuye el 50 %, y el 13 % de la población disfruta de una renta alta y se embolsa el 40 % de la riqueza total. En particular, nótese que casi la mitad de la población es de renta media y acumula la mitad de los bienes totales de los que disponen las clases medias y bajas.

Esos porcentajes están calculados considerando la sociedad como una agrupación de individuos. No podemos olvidar, sin embargo, que la célula básica de la organización social no es el individuo, sino la familia. Así, si se recalculan esos porcentajes teniendo en cuenta este hecho, las estadísticas mejoran y presentan una sociedad más equitativa. Consideremos el ejemplo de una familia en la que uno de los miembros de la pareja disfruta de una renta media (por ejemplo, 1500 euros), mientras que el otro solo dispone de una renta baja (digamos, 700 euros): en promedio, ambos reciben una renta media, con un montante de 1100 euros para cada uno. Este efecto recombinatorio por pares de los individuos implica un reparto de riqueza más equilibrado.

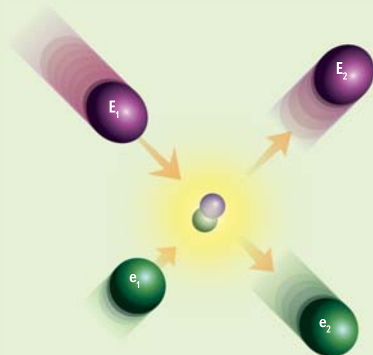
Por otra parte, el grupo de las rentas privilegiadas, compuesto por el 5 % de la población, posee normalmente entre el 20 y el 40 % de la riqueza total de la sociedad. Ello significa que la riqueza media por agente de la clase privilegiada es unas cinco veces superior a la riqueza media por agente de las clases medias y bajas. Pero ¿cómo se reparten esos agentes privilegiados la riqueza que poseen? Justamente, conforme a la regla de Pareto que mencionábamos más arriba. Una distribución potencial quiere decir que la probabilidad de que uno de esos agentes posea una renta determinada viene dada por una potencia inversa de dicha renta. Tales distribuciones son, precisamente, las que inducen repartos conforme a la regla del 80-20. Los números 80 y 20 son aproximados y dependen del exponente concreto que rige la ley de potencias que determina la distribución, pero el comportamiento cualitativo es siempre el mismo: un K % de la clase privilegiada tiene acceso al (100-K) % de la riqueza de la que dispone el grupo, y viceversa (donde K es distinto de 50).

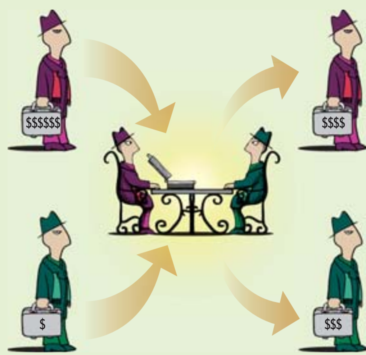
Pero la característica principal de una distribución semejante reside en su fuerte inhomogeneidad: el reparto de dinero que hacen entre sí los agentes de las clases privilegiadas es, con diferencia, mucho menos equitativo que el reparto entre las cla-

FÍSICA Y ECONOMÍA

Modelos de tipo gas

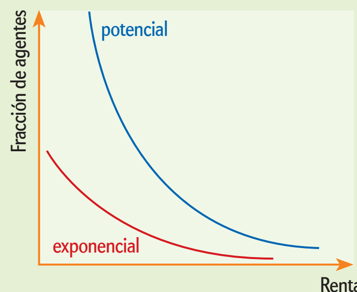
El reparto de bienes en las sociedades capitalistas puede describirse mediante los modelos matemáticos que se emplean en el estudio de los gases. En numerosos aspectos, las transacciones económicas son análogas al intercambio de energía que las partículas de un gas experimentan en los choques.





Principio de conservación
Al igual que ocurre con la energía total de las partículas de un gas tras un choque (*izquierda*), en una transacción económica la cantidad total de dinero se conserva (*derecha*).

Clases medias y bajas: distribución exponencial
En un gas de partículas que se mueven libremente, la distribución de energías en el equilibrio sigue una ley exponencial: si T es la temperatura del gas, la probabilidad de encontrar una partícula con energía E resulta proporcional a $\exp(-E/T)$. Se trata del mismo tipo de distribución que hallamos en el reparto de bienes de la mayor parte de la población (clases medias y bajas, *rojo*). La renta de un agente es análoga a la energía de una partícula; la renta media, a la temperatura del gas. En este modelo económico los agentes interaccionan al azar e intercambian siempre una fracción aleatoria de dinero.



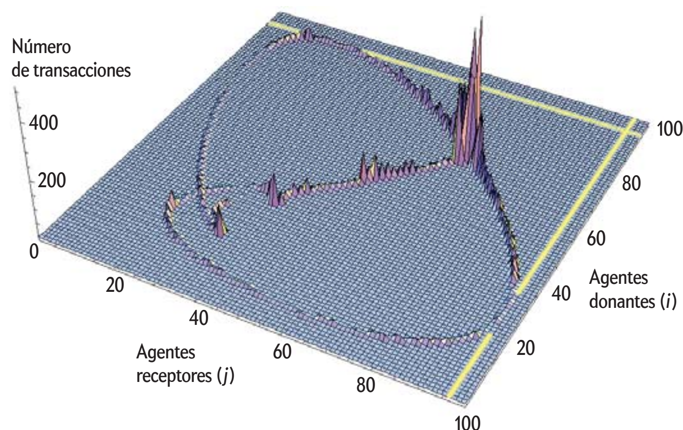
Clases altas: distribución potencial
En las clases altas el reparto de bienes no es exponencial, sino potencial: la probabilidad de hallar a un agente con una renta es proporcional a una potencia inversa de dicha renta (*azul*). Dicha distribución se recupera cuando introducimos un «coeficiente de ahorro» para cada agente: una fracción de sus bienes que nunca se juega en sus intercambios de dinero.

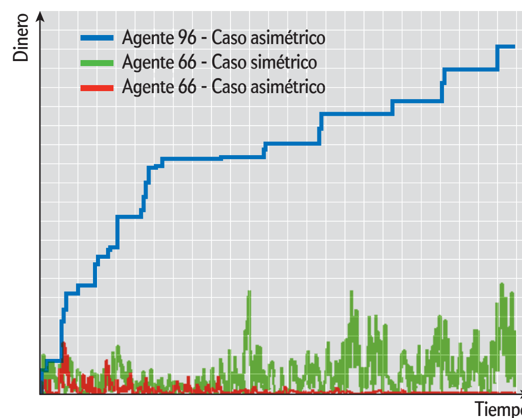
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Correlaciones caóticas

Si bien a corto plazo las transacciones económicas entre individuos son deterministas (los agentes no interactúan al azar y sus motivaciones están bien definidas), la evolución de una economía real resulta impredecible a largo plazo. En física, ese comportamiento se corresponde con el que exhiben los sistemas caóticos. Es posible introducir una componente caótica en los modelos de tipo gas para simular este comportamiento de la economía. Si, además, se incorporan asimetrías en el mecanismo que genera la señal caótica, se producirán desigualdades en el reparto de la riqueza.

Por ejemplo, los pares (i,j) de agentes que interactúan pueden seleccionarse mediante una dinámica caótica. De esta manera, al igual que en las economías reales, unos agentes interaccionarán entre sí más que otros (*izquierda*). La figura muestra el número de interacciones que realiza cada par en una red de 100 agentes. Por ejemplo, las interacciones del agente 96 (*amarillo*) muestran que este actúa como receptor frente a los agentes 21-39. A su vez, nunca actúa como donante, lo que implica su inevitable enriquecimiento, al tiempo que otros agentes se empobrecen (*derecha*).





ses medias y bajas. Además, la regla del 80-20 es aplicable a todas las escalas: cualquier subgrupo de privilegiados que escogiésemos seguiría verificando la misma regla. Esta ausencia de escalas es precisamente lo que caracteriza a la distribución potencial, motivo por el que también se conoce bajo el nombre de distribución libre de escala.

MODELOS DE TIPO GAS

¿Qué relación guardan los modelos de tipo gas con las dos clases de distribuciones de las que hemos venido hablando? Una primera indicación proviene de un resultado elemental en mecánica estadística: cuando se alcanza el equilibrio, la distribución de energías en un gas de partículas que se mueven libremente es, precisamente, una distribución exponencial. Es decir, las partículas de un gas se reparten la energía de la misma manera en que las clases medias y bajas se reparten sus bienes. En particular, la renta media es el análogo a la temperatura del gas.

La dinámica mediante la cual se obtiene una distribución exponencial es la siguiente: (1) partimos de un conjunto de agentes, todos ellos con la misma cantidad inicial de dinero; (2) se permiten transacciones binarias aleatorias; es decir, en cada momento se permite un intercambio de bienes entre un donante y un receptor escogidos al azar; (3) se decide, también de manera aleatoria, una proporción de la riqueza media que ambos poseen; (4) se traspasa dicha cantidad, cuando sea posible, del agente donante al que le ha tocado en suerte ser receptor. Si dejamos evolucionar este gas de agentes, la distribución asintótica resultante coincide con la distribución exponencial. Observemos que, en este modelo, todos los componentes son aleatorios: tanto las parejas de agentes que interaccionan en cada instante como la fracción de su dinero que intercambian. Dado que cada interacción local conserva el dinero, la dinámica global también es conservativa y la suma total de dinero permanece constante con el tiempo.

¿Cómo podemos recuperar la distribución de Pareto? Para modelizar con un gas de agentes este tipo de comportamiento es necesario introducir una hipótesis de inhomogeneidad: cada agente presenta un coeficiente de ahorro propio que toma un valor entre cero y uno. Dicho coeficiente expresa la proporción de dinero que cada individuo no se juega en sus interacciones con el resto. Así, si partimos de un gas de agentes donde inicialmente todos poseen la misma cantidad de dinero y lo dejamos evolucionar mediante interacciones binarias al azar (pero sujetas a la condición que impone su coeficiente de ahorro), la distribución asintótica de reparto resulta ser una distribución potencial. Hagamos notar que, también aquí, el coeficiente de ahorro de cada agente se determina de manera aleatoria.

SISTEMAS CAÓTICOS

Vista la capacidad de los modelos de tipo gas para reproducir las distribuciones de riqueza de una manera tan simple, quizá sea posible dar otro paso hacia una modelización más acorde con la realidad. A corto plazo, la economía tiene un claro componente determinista. Ello es consecuencia de unos intereses bien definidos, ya que, en principio, los agentes económicos no realizan sus transacciones al azar, sino que persiguen algún tipo de beneficio. A pesar de ello, el resultado global a largo plazo es totalmente impredecible, como demuestran las recurrentes crisis económicas que han asolado a la sociedad a lo largo de la historia. Un determinismo a corto plazo y una impredecibilidad a escalas de tiempo grandes son justamente dos propiedades in-

A PARTIR DE: «TRANSITION FROM EXPONENTIAL TO POWER LAW INCOME DISTRIBUTIONS IN A CHAOTIC MARKET», C. PELLICER-LOSTAO Y R. LÓPEZ-RUIZ EN *INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS C*, PÁGS. 21-33, 2011

trínsecas a todo sistema caótico. Así, parece conveniente sustituir el componente aleatorio de los modelos anteriores por uno caótico.

Podemos entender con facilidad en qué consiste un sistema caótico si imaginamos un panadero moldeando la masa del pan. Cuando agrega sal a la masa, es posible seguir la evolución de los granos de sal durante los primeros pliegues de la masa, pero perderemos su rastro conforme se van reiterando los pasos y realizando la mezcla. Obsérvese que, a largo plazo, el resultado final sería como haber salado la masa de forma aleatoria, por más que inicialmente fuese colocada toda junta en un mismo lugar. Así pues, las diferencias fundamentales entre el comportamiento de un sistema caótico y otro aleatorio tienen que ver, sobre todo, con el comportamiento a corto plazo; el comportamiento a largo plazo en ambos casos puede considerarse similar.

La introducción de un componente caótico puede realizarse por dos vías. Por un lado, es posible seleccionar de manera caótica qué pares de agentes interaccionan. Por otro, puede establecerse caóticamente el coeficiente de reparto que emplean los agentes en cada interacción. El uso de una dinámica caótica en la selección de pares implica que los agentes no interaccionan al azar con el resto. Debido a las correlaciones que se derivan de una señal caótica, los agentes interaccionan con mayor probabilidad con un grupo de agentes de su entorno. Sin embargo, como consecuencia de la impredecibilidad de la señal, también lo harán con agentes más alejados.

En el modelo de tipo gas, los conceptos de «cercanía» y «lejanía» se definen a partir de la distancia en la red de agentes que resulta del etiquetado inicial y que permite la identificación de los mismos. Este detalle hace más razonable el modelo, ya que, en la vida cotidiana, los individuos solemos interaccionar con un grupo de agentes locales más o menos fijo (frutero, peluquero, etcétera) y con otros grupos fluctuantes de agentes ajenos al entorno (grandes centros comerciales o comercio electrónico).

DE UNA DISTRIBUCIÓN A OTRA

Cuando el caos empleado en el modelo económico de tipo gas procede de un sistema caótico con algún tipo de simetría especular, podemos generar una señal que selecciona los agentes de manera simétrica. Es decir, los dos miembros de un par (i, j) cuentan con la misma probabilidad de ser el donante o el receptor de la transacción. De esta manera, la transferencia de dinero fluye indistintamente del agente i al agente j, o viceversa. En tal caso, el resultado final es idéntico al del caso aleatorio: los agentes resultan indistinguibles y la distribución asintótica de la riqueza es exponencial.

Sin embargo, cuando la simetría especular del sistema caótico se rompe, ello afecta a la dinámica del sistema económico. El resultado neto puede traducirse en la existencia de un pequeño grupo de agentes que, la mayor parte de las veces, aparecen como receptores. Además, ello viene determinado únicamente por los parámetros iniciales del modelo. Si se hace crecer esta asimetría, aparecen incluso agentes que nunca pierden. De esta forma, dichos individuos acumulan la mayor parte de los bienes totales; su riqueza aumenta con el tiempo, mientras que el resto se empobrece. La distribución final es de tipo potencial entre el pequeño grupo de agentes ganadores, mientras la mayoría de los individuos conforma una masa de agentes empobrecidos que se reparten la riqueza conforme a una distribución exponencial.

Queda patente la importancia que reviste en un sistema económico la simetría en las transacciones comerciales: un agente puede acabar en el grupo de las clases favorecidas dependiendo de las circunstancias y de su posición social inicial. Si esto es extrapolable a toda la sociedad, podríamos afirmar que el «sueño americano» solo se realizaría en una sociedad con reglas de comercio simétricas y en la que todos sus individuos cuentan con las mismas oportunidades para ganar o perder. Sin embargo, la realidad se aleja de esta premisa: siempre suele haber un pequeño porcentaje de agentes que parten con ventaja con respecto a los demás. Esto es todavía más acusado en las economías de países emergentes, donde las relaciones de poder entre las clases sociales determinan con más fuerza los grupos de agentes ganadores. Grupos de poder bien establecidos pueden acabar acumulando un gran porcentaje de la riqueza del país.

A corto plazo, la economía tiene un claro componente determinista; sin embargo, los resultados a largo plazo son impredecibles. Esas son dos propiedades intrínsecas a todo sistema caótico

Vemos pues que los modelos de tipo gas constituyen una modelización sencilla pero a la vez elocuente de las transacciones económicas y los repartos de riqueza que estas generan. Por un lado, unas reglas de juego simétricas (con interacciones aleatorias o caóticas) dan lugar a una distribución exponencial de la riqueza: aquella que, en nuestras sociedades, afecta a la gran mayoría de la población. Por otra parte, la ruptura de la simetría en las interacciones entre agentes provoca que una fracción de ellos acumule gran parte de la riqueza total. La distribución de riqueza entre ese grupo de privilegiados resulta ser la distribución de Pareto, la misma que en nuestras sociedades rige el reparto de bienes de las clases altas.

Los modelos expuestos aquí para explicar la transición entre la distribución exponencial y la potencial complementan a otros existentes en la bibliografía. Uno de los autores (López-Ruiz) y otros colaboradores han propuesto un modelo que reproduce la misma transición de distribuciones al modificar el número de vecinos con los que interactúa un agente en un modelo económico determinista.

Con toda probabilidad, en los próximos años la econofísica dará lugar a nuevos avances en lo que a nuestra comprensión de los sistemas económicos se refiere. Ese conocimiento debería emplearse para implementar políticas de mayor equidad social así como para, en la medida de lo posible, predecir el comportamiento de los mercados con el objetivo de evitar futuras crisis.

PARA SABER MÁS

Geometrical derivation of the Boltzmann factor. R. López-Ruiz, J. Sañudo y X. Calbet en *American Journal of Physics*, vol. 76, págs. 780-781, 2008.

Statistical mechanics approach to Econophysics. V. M. Yakovenko en *Encyclopedia of Complexity and System Science*, dirigido por R. A. Meyers, págs. 2800-2826. Springer; Berlín, 2009.

Transition from Pareto to Boltzmann-Gibbs bahavior in a deterministic economic model. J. González-Estévez, M. G. Cosenza, O. Alvarez-Llamoza y R. López-Ruiz en *Physica A*, vol. 388, págs. 3521-3526, 2009.

A chaotic gas-like model for trading markets. C. Pellicer-Lostao y R. López-Ruiz en *Journal of Computational Science*, vol. 1, págs. 24-32, 2010.

Econophysics: An introduction. S. Sinha, A. Chatterjee, A. Chakraborti y B. K. Chakrabarti. Wiley-VCH; Berlín, 2010.


Alex de Sherbinin es investigador en el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia y subgerente del Centro de Datos y Aplicaciones Socioeconómicas de la NASA.


Koko Warner trabaja en el Instituto Universitario de las Naciones Unidas para el Entorno y la Seguridad Humana (UNU-EHS). Investiga el cambio climático y las migraciones inducidas por causas ambientales.


Charles Ehrhart es coordinador de la respuesta global al cambio climático en CARE International, una organización sin ánimo de lucro dedicada a luchar contra la pobreza en el mundo.

MEDIOAMBIENTE

Víctimas del cambio climático

Los trastornos en las pautas pluviales y los desplazamientos del litoral provocarán migraciones sin precedentes

Alex de Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart


TOM STODDART/GETTY IMAGES

Desde que existen registros históricos, las migraciones impuestas por el clima han remodelado la civilización. Hace unos cuatro mil años, una larga sequía obligó a Jacob y su prole a abandonar Canaan en dirección a Egipto; exilio que no conocería fin hasta el éxodo que habría de liderar Moisés. Tres milenios después, la falta de lluvias y pastos contribuyeron a que las tropas mongolas abandonasen Asia Central y llegasen a Europa, donde acabarían por establecerse. Ya en el siglo xx, una catástrofe ecológica detonada por la sequía y exacerbada por una desdichada política agrícola obligó a tres millones y medio de personas a desplazarse del Medio Oeste de EE.UU., en el episodio conocido como el *Dust Bowl* («Cuenco de Polvo») americano.

Hoy la historia se repite, pero el escenario es otro. Estamos entrando en una era marcada por rápidos cambios climáticos debidos a la emisión de gases de efecto invernadero. Entre otras consecuencias, se prevén alteraciones notables en la pluviosidad, una mayor frecuencia de fenómenos extremos como sequías

EN SÍNTESIS

El cambio climático provocado por el calentamiento global perturbará gravemente la vida de millones de personas, que pueden verse obligadas a emigrar de su tierra.

Examinamos aquí tres regiones del mundo donde los efectos del cambio climático ya han comenzado a provocar el abandono de las tierras por parte de la población.

Es imposible pronosticar con exactitud la magnitud y la dirección que tomarán las migraciones, pero deben tomarse medidas políticas para paliar las consecuencias.



A la deriva: Una familia vadea las calles de Chokwe, en Mozambique. Como consecuencia de las inundaciones, cada vez más frecuentes, numerosas familias se han visto forzadas a realojarse de manera permanente.

o inundaciones, la elevación del nivel del mar, la acidificación de los océanos y cambios prolongados en las distribuciones de lluvias y temperaturas. Cualquiera de esos fenómenos trastornaría con severidad los ecosistemas de los que dependemos. En un mundo cada vez más poblado, las consecuencias podrían incluir migraciones en masa de una escala sin precedentes.

La suerte que correrán las islas de baja altura sobre el nivel del mar ha despertado un enorme interés. De darse ciertos supuestos, gran parte de los 38 estados insulares de pequeña extensión que existen en el planeta podrían haber desaparecido a finales de siglo. Pero las dificultades que habrían de afrontar sus habitantes no serían más que la parte visible del atolón. Tan solo en la India, una elevación de un metro en el nivel del mar obligaría a desplazarse a 40 millones de personas. Esta no constituye la única catástrofe de origen climático a la que se enfrenta el sur de Asia: los modelos de Arthur M. Greene y Andrew Robertson, de la Universidad de Columbia, no solo sugieren un aumento en el monto pluviométrico total durante los monzones, sino también una reducción en el número de días de lluvia. Los cambios en los ciclos fluviales (consecuencia de una menor cantidad de nieve durante el invierno y de una disminución de la masa glaciar) afectarían al modo de vida de cientos de millones de agricultores en las zonas rurales y a los recursos alimenticios de un número equiparable de urbanitas.

Tal vez tardemos decenios en comprender en toda su magnitud las consecuencias de la fusión de los glaciares y de la elevación del nivel del mar. En cualquier caso, el aumento en la cantidad de catástrofes de origen climático ya es constatable: el número de desastres naturales ha aumentado en más del doble desde la década de 1980, y la fracción de los que se encuentran vinculados al clima también ha ascendido (del 77 al 82 por ciento). La Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (UNOCHA) y el Centro de Supervisión de Migraciones Internas (IDMC) estimaron que, en 2008, las calamidades relacionadas con el clima expulsaron de su hogar a 20 millones de personas. La cifra es más de cuatro veces el número de desplazados por conflictos violentos.

Las migraciones forzadas por el cambio climático amenazan con convertirse en el mayor reto humanitario que la comunidad internacional habrá de afrontar durante los decenios venideros. En este artículo pretendemos dar cuenta de lo que el futuro nos reserva; para ello, nos basamos en los indicios que ya se han registrado en tres partes del mundo. En Mozambique, una combinación de inundaciones y sequías periódicas ha atenazado a la población rural. En el delta del Mekong las riadas siempre han sido habituales, pero la magnitud de las últimas inundaciones ha superado cualquier registro histórico. Además, la región se enfrenta a una pérdida catastrófica de tierras cultivables como consecuencia del aumento previsto del nivel del mar. Por último, en México y América Central, las tormentas tropicales y los ciclones han desplazado ya a miles de personas, y la sequía representa una amenaza constante.

Carecería de sentido intentar pronosticar con precisión la magnitud, localización y momento de las migraciones futuras. Esperamos, sin embargo, que la exposición de estos casos estimule análisis más completos, que sirvan para determinar en qué lugares del globo habremos de esperar migraciones y para planear las medidas humanitarias que habrán de adoptarse, a escala regional e internacional.

Las fuentes en que se basan nuestros análisis proceden del proyecto de la Comisión Europea «Cambio Ambiental y Escenarios de Migración Forzosa» (EACH-FOR), de un estudio global sobre migraciones inducidas por el clima y de un estudio llevado a cabo por el Centro para la Red Internacional de Información de las Ciencias de la Tierra (CIESIN), del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Los autores agradecen las aportaciones de Susana Adamo y Tricia Chai-Onn, de CIESIN, y de Mark Stal, Olivia Dun y Stefan Alscher, autores del estudio de EACH-FOR.

PARA SABER MÁS

In search of shelter: Mapping the effects of climate change on human migration and displacement. Koko Warner et al. Disponible en **www.ciesin.columbia.edu/documents/ClimMigr-rpt-june09.pdf**

Cambio Ambiental y Escenarios de Migración Forzosa. Proyecto de la Comisión Europea. Casos de estudio e informe final disponibles en **www.each-for.eu**

Centro de Información sobre el Cambio Climático de CARE International: **www.careclimatechange.org**

Low elevation coastal zone urban-rural estimates. CIESIN, Universidad de Columbia. **http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/lecz.jsp**

MOZAMBIQUE:

DOBLE CERCO

Mozambique se extiende a lo largo de la costa oriental de África y abarca una superficie de unos 800.000 kilómetros cuadrados. Cuenta con un historial de migraciones y reasentamientos patrocinados por el Gobierno, consecuencia de su pasado socialista y de la guerra civil de 16 años que concluyó en 1992. Durante el conflicto, cinco millones de personas se vieron forzadas a huir de su hogar. En los cuatro años posteriores al fin de las hostilidades, 1,7 millones de mozambiqueños regresaron desde Malaui, Zimbabue, Suazilandia, Zambia, Sudáfrica y Tanzania.

Si bien la guerra civil pertenece al pasado, Mozambique se enfrenta ahora a una nueva crisis. En los años 2000, 2001 y 2007, las cuencas de los ríos Zambezi y Limpopo sufrieron inundaciones que desalojaron a cientos de miles de personas. Solo las acontecidas en 2007 obligaron a desplazarse a más de 100.000 mozambiqueños, la mitad de los cuales fueron evacuados a «centros de acomodo» provisionales. En ese mismo año, después de que las aguas volviesen a su cauce, el ciclón Favio provocó una nueva crecida del Zambezi. La población afectada perdió sus viviendas y medios de subsistencia, y careció de servicios médicos, saneamiento y agua potable. Catástrofes dobles o triples como esta socavan con extrema gravedad la capacidad de recuperación de las comunidades afectadas.

Tras las riadas de 2001, el Gobierno incentivó a la población para que se reubicase lejos de las llanuras con riesgo de inundación. A cambio, ofrecía infraestructuras y otras compensaciones por el trabajo: en pago a la fabricación de ladrillos, por ejemplo, el Gobierno prometía financiar más materiales de construcción y asistencia técnica. En entrevistas realizadas por Mark Stal para el proyecto EACH-FOR, los desplazados declararon que, con anterioridad al último decenio, las comunidades habían abandonado en

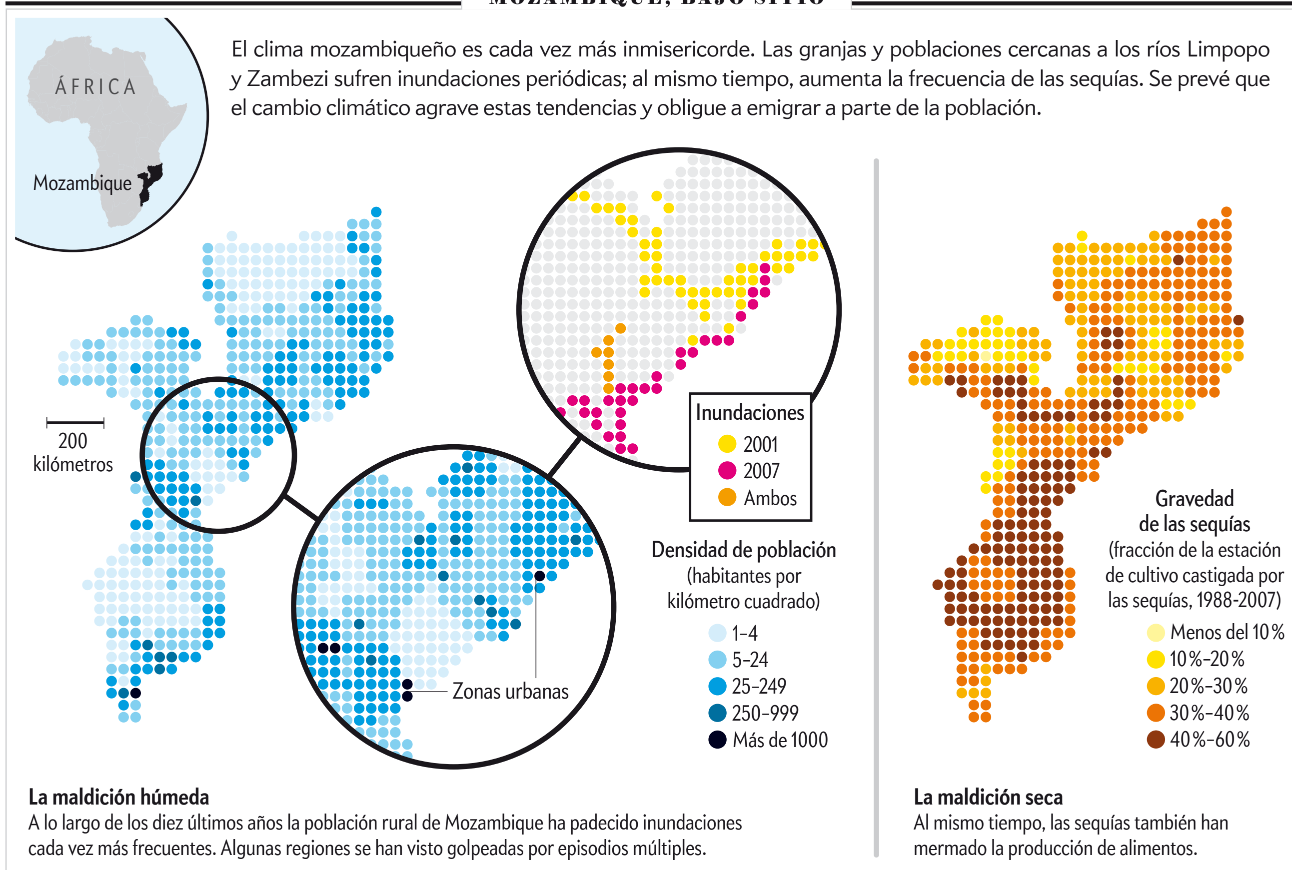
otras ocasiones las llanuras para huir de las inundaciones; sin embargo, nunca se habían visto obligados a considerar un realojo permanente.

La más amarga ironía es que Mozambique puede verse golpeado por la sequía y por las riadas al mismo tiempo. Así ocurrió en 2007, cuando la región meridional padeció una gran sequía mientras el Zambezi, más al norte, se desbordaba. Los modelos climáticos disponibles sugieren que la pluviosidad podría aumentar en el norte del país y disminuir en el sur. La magnitud del desastre dependerá, en gran medida, del espaciamiento e intensidad de las precipitaciones. En caso de intensificarse, se repetirán las catastróficas crecidas de la última década. Por desgracia, los climatólogos pronostican para este siglo una variabilidad todavía más acusada, con bruscos vaivenes entre períodos de sequía e inundación extremas. Países como Mozambique quedarían a merced de patrones climáticos cada vez más imprevisibles.

La población realojada depende todavía en gran medida de las ayudas gubernamentales e internacionales. Las regiones de recolocación carecen de las infraestructuras mínimas para garantizar una economía autosuficiente, como escuelas u hospitales, y la ruina de las cosechas continúa siendo algo habitual. De faltar la ayuda humanitaria externa, tanto expertos como entrevistados conjeturan nuevas migraciones, dentro y fuera de las fronteras del país. Maputo, la capital, y Sudáfrica se antojan como los destinos más probables. Las perspectivas en otras ciudades o países vecinos se presentan aún menos atractivas.



El pozo de los deseos: Una mujer intenta extraer agua de un pozo asolado por la sequía en Malange, Mozambique.



JENNY MATTHEWS/ALAMY (*fotografía*); JEN CHRISTIANSEN (*mapas*). FUENTES: CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK (CIESIN), COLUMBIA UNIVERSITY; INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE (IFPRI); BANCO MUNDIAL; CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT); 2009, GLOBAL RURAL-URBAN MAPPING PROJECT (GRUMP), BETA VERSION: POPULATION DENSITY GRIDS; SOCIOECONOMIC DATA AND APPLICATIONS CENTER (SEDAC), UNIVERSIDAD DE COLUMBIA, HTTP://SEDAC.CIESIN.COLUMBIA.EDU/GPW (*densidades de población*); DARTMOUTH FLOOD OBSERVATORY; MOZAMBIQUE FLOOD EXTENTS (*inundaciones*); BRADFIELD LYON IRI/EARTH INSTITUTE, COLUMBIA UNIVERSITY; GLOBAL PRECIPITATION CLIMATOLOGY CENTER (GPCC) (*datos de pluviosidad*); IRI DATA LIBRARY (*sequías*)

DELTA DEL MEKONG:

ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

En su parte vietnamita, el delta del Mekong da hogar a 18 millones de personas, el 22 por ciento de la población de Vietnam. Allí se encuentra el 40 por ciento de las plantaciones del país y se genera más de la cuarta parte de su PIB. Los habitantes de la región producen más de la mitad del arroz, el 60 por ciento de la pesca y el 80 por ciento de la cosecha hortofrutícola de Vietnam.

Todo lo anterior corre peligro. Según un estudio del CIESIN, de la Universidad de Columbia, una elevación de un metro en el nivel del mar desplazaría del delta del Mekong a siete millones de moradores. Con una subida de dos metros, el número de damnificados llegaría hasta los 14 millones, la mitad de la población del delta. En ese caso, algunas partes de la Ciudad de Ho Chi Minh, la más habitada del país, también quedarían sumergidas. (Aunque una elevación de dos metros en este siglo supera lo que se tiene por probable, un cambio climático severo provocaría que los glaciares de Groenlandia y los de la Antártida occidental se derritiesen con mucha mayor rapidez de lo previsto. En tal caso, el nivel del mar sí podría haber subido dos metros para 2100.)

Las inundaciones han desempeñado un papel importante en la economía y la cultura de la región. En el delta y río arriba, hasta Camboya, sus gentes siempre han vivido y dependido de los ciclos de riadas, aunque dentro de ciertos límites. Una crecida de entre medio metro y tres metros se considera normal y beneficiosa para los campesinos, quienes las denominan «crecidas bonitas». Pero riadas mayores acarrean graves dificultades y, a menudo, problemas de subsistencia.

Las últimas décadas han visto un aumento en la frecuencia y magnitud de las crecidas de más de cuatro metros. Olivia Dun, miembro del proyecto EACH-FOR, entrevistó en Phnom Penh, la capital de Camboya, a emigrantes del delta. «En ocasiones las crecidas nos han hecho temer por nuestra vida. Por eso hemos venido aquí, para buscar otra forma de subsistencia», narraba uno de ellos. Otro relataba cómo la extrema frecuencia de las riadas había arruinado los cultivos de su familia.

El cambio climático, las catástrofes naturales y la presión ambiental que padece la región como consecuencia de su rápida industrialización han puesto en peligro los recursos naturales de Vietnam. Los moradores del delta del Mekong han afrontado la situación de maneras diversas. Quienes han optado por la emigración han preferido, por lo general, trasladarse a las ciudades, donde la economía experimenta un rápido crecimiento.

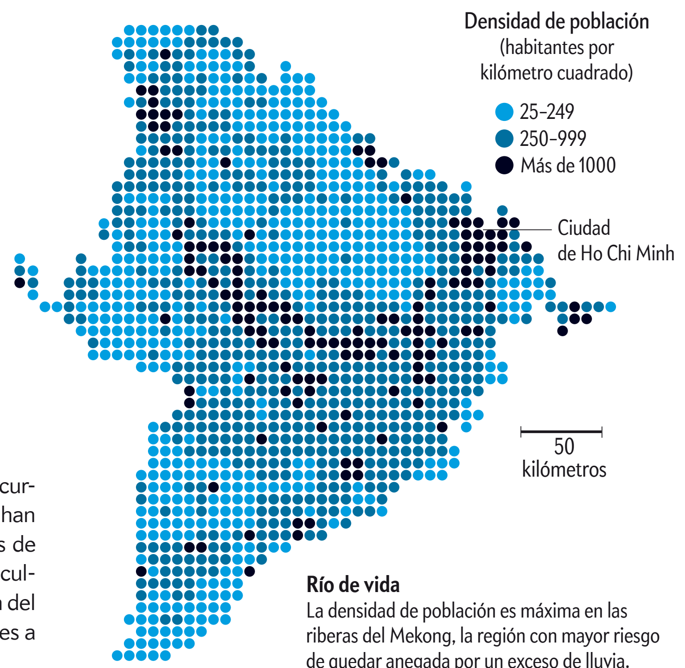
Por su parte, el gobierno vietnamita ha desarrollado el programa «convivir con las crecidas», que incluye incentivos para que los campesinos dirijan sus actividades hacia la acuicultura (la cría de gambas o pescado en estanques cerrados). En la provincia de An Giang, el programa también contempla alejar del Mekong a la población residente en la cuenca del brazo principal. Para 2020 ya se ha previsto la reubicación de unos 20.000 hogares de la provincia. La lista incluye, en su mayoría, a familias sin tierras, que no tendrían a dónde ir si las riadas o los corrimientos de tierra destruyesen sus viviendas, ni tampoco medios para emigrar a la ciudad. La subsistencia de estas personas depende en gran medida de su entorno familiar y social, pues no suelen tener más opción que ser contratados día a día como mano de obra. Y aunque la mayoría de los «agrupamientos residenciales» previstos se encuentran en el radio de unos dos kilómetros de las actuales viviendas de los refugiados, los realojamientos podrían desgarrar ese tejido social.

FUENTES: CIESIN; IFPRI; BANCO MUNDIAL; CIAT; 2009, GRUMP, BETA VERSION: POPULATION DENSITY GRIDS; SEDAC (*densidades de población*)

ALERTA EN EL MEKONG

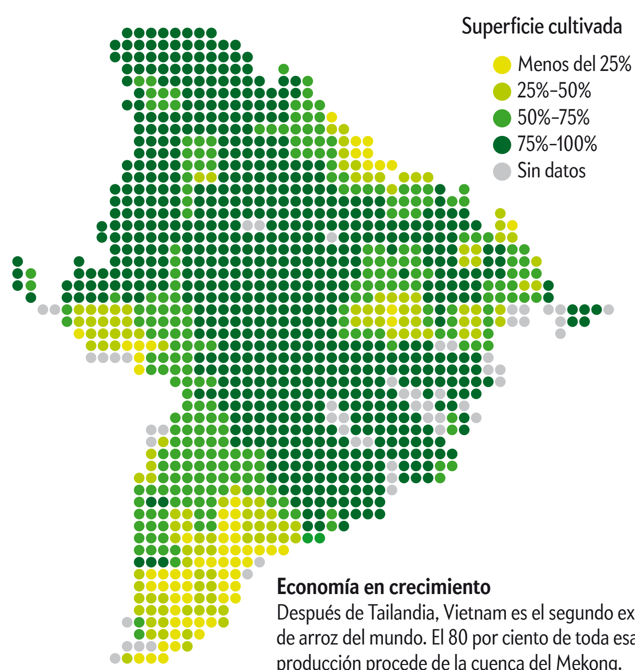


El delta del Mekong produce una fracción importante de los recursos agropecuarios de Vietnam. Aunque las crecidas periódicas han irrigado siempre los arrozales, la magnitud de las inundaciones de los últimos decenios supone un peligro cada vez mayor para los cultivos. Además, la zona se encuentra amenazada por la elevación del nivel del mar: una subida de un metro desplazaría de sus hogares a más de siete millones de personas.

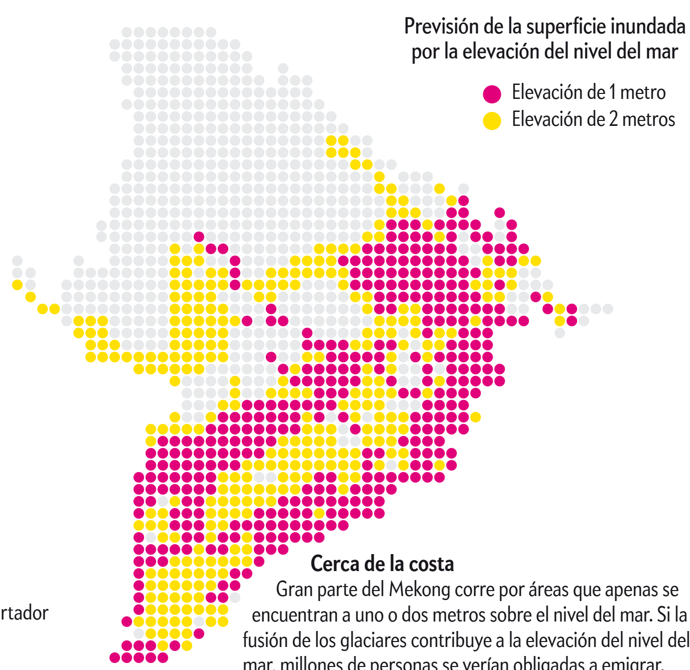


Río de vida
La densidad de población es máxima en las riberas del Mekong, la región con mayor riesgo de quedar anegada por un exceso de lluvia.

Crecida: Esta vivienda y otras 400.000 han sucumbido a las peores riadas que se han visto en cuatro décadas en el delta del Mekong.



Economía en crecimiento
Después de Tailandia, Vietnam es el segundo exportador de arroz del mundo. El 80 por ciento de toda esa producción procede de la cuenca del Mekong.



Cerca de la costa
Gran parte del Mekong corre por áreas que apenas se encuentran a uno o dos metros sobre el nivel del mar. Si la fusión de los glaciares contribuye a la elevación del nivel del mar, millones de personas se verían obligadas a emigrar.

MÉXICO Y AMÉRICA CENTRAL:

TORMENTAS Y SEQUÍAS



La última gota: Charca de agua salobre en el valle de Tehuacán, próximo a Ciudad de México. Los habitantes de la zona dependen ahora de estas charcas, antes usadas para abrevar el ganado.

BRENT STIRTON/GETTY IMAGES

En México y América Central viven unos 10 millones de campesinos, muchos de los cuales apenas cubren sus necesidades básicas con los cultivos tradicionales (maíz, frijoles y calabazas). Como todos los campesinos del mundo, su subsistencia depende de que las lluvias caigan con moderación: si no llegan, las plantas perecen; si son excesivas, las escorrentías arrastran la tierra y los cultivos.

En ocasiones, un mismo año puede verse golpeado por sequías y por tormentas. En julio de 2001, Honduras sufrió una sequía que afectó a un cuarto de millón de personas; meses después, una tormenta tropical anegaba campos y cultivos.

Numerosos campesinos encuentran demasiado precarios sus medios de subsistencia y se desplazan hacia el norte. La gran mayoría de los emigrados a EE.UU. procede de zonas rurales pobres de México y América Central. Los suelos esquilmados, la deforestación y el desempleo se cuentan entre las causas primarias de la emigración —sin olvidar la esperanza de los altos salarios de «El Norte»—. A tales desgracias hemos de sumar los factores climáticos. Stefan Alscher, también de EACH-FOR, halló que en el estado de Tlaxcala, en México central, la liberalización de los mercados durante los años noventa y una disminución de la pluviosidad acabaron por reducir aún más los ingresos de los campesinos. La situación indujo a emigrar a algunos. Uno de los granjeros entrevistados consideraba la emigración como un último recurso: «Mi abuelo, mi padre y yo hemos trabajado estas tierras. Pero los tiempos han cambiado... Ahora las lluvias llegan más tarde y rinden menos. La solución es marcharse [a EE.UU.], al menos durante algún tiempo».

Se teme que el cambio climático provoque una disminución de entre un 10 y un 20 por ciento en la pluviosidad de Tlaxcala. Y, en comparación con otros de la región, ese estado quizá salga bien parado. Casi toda la irrigación de la zona tiene lugar en las llanuras costeras, como las de Jalisco y Sinaloa (grandes estados agrícolas que, en conjunto, producen casi el 18 por ciento del PIB agrícola de México). Según datos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), para 2080 el agua disponible en esos estados podría verse recortada entre un 25 y 50 por ciento. Ello arrasaría la productividad de la zona.

Pero las sequías no constituyen el único temor en la región. Los climatólogos pronostican que, en los próximos cien años, México y América Central sufrirán una mayor frecuencia de tormentas tropicales intensas. Las experiencias pasadas nos dan una idea de lo que podemos esperar. En 1998, el huracán Mitch —la tormenta tropical más mortífera de los 200 últimos años— le costó la vida a más de 11.000 personas en Honduras y Nicaragua, además de causar daños por valor de miles de millones de euros. En 2007, la tormenta tropical Noel anegó casi el 80 por ciento del estado mexicano de Tabasco y obligó a desplazarse a unas 500.000 personas. En el pasado, los desplazamientos de población ocasionados por desastres naturales solían ser locales y de corta duración. Pero catástrofes más extensas y frecuentes provocarían que no pocos abandonasen de manera definitiva sus lugares de origen.

No existen soluciones sencillas. Hasta ahora, la emigración estacional ha ayudado a la población de las regiones agrícolas a sobrellevar el problema. En previsión de que la mayor parte de las migraciones futuras se dirigirán, al igual que en el pasado, hacia EE.UU. y Canadá, los Gobiernos de estos países quizás expidan visados temporales tras grandes desastres climáticos, como sequías o inundaciones. Las remesas de los emigrados hacia sus países de origen contribuirían a la recuperación de las economías locales. Pero, a más largo plazo, los planes para la región habrán de incluir el desarrollo de técnicas de regadío más eficientes y nuevos medios de subsistencia para las poblaciones afectadas.

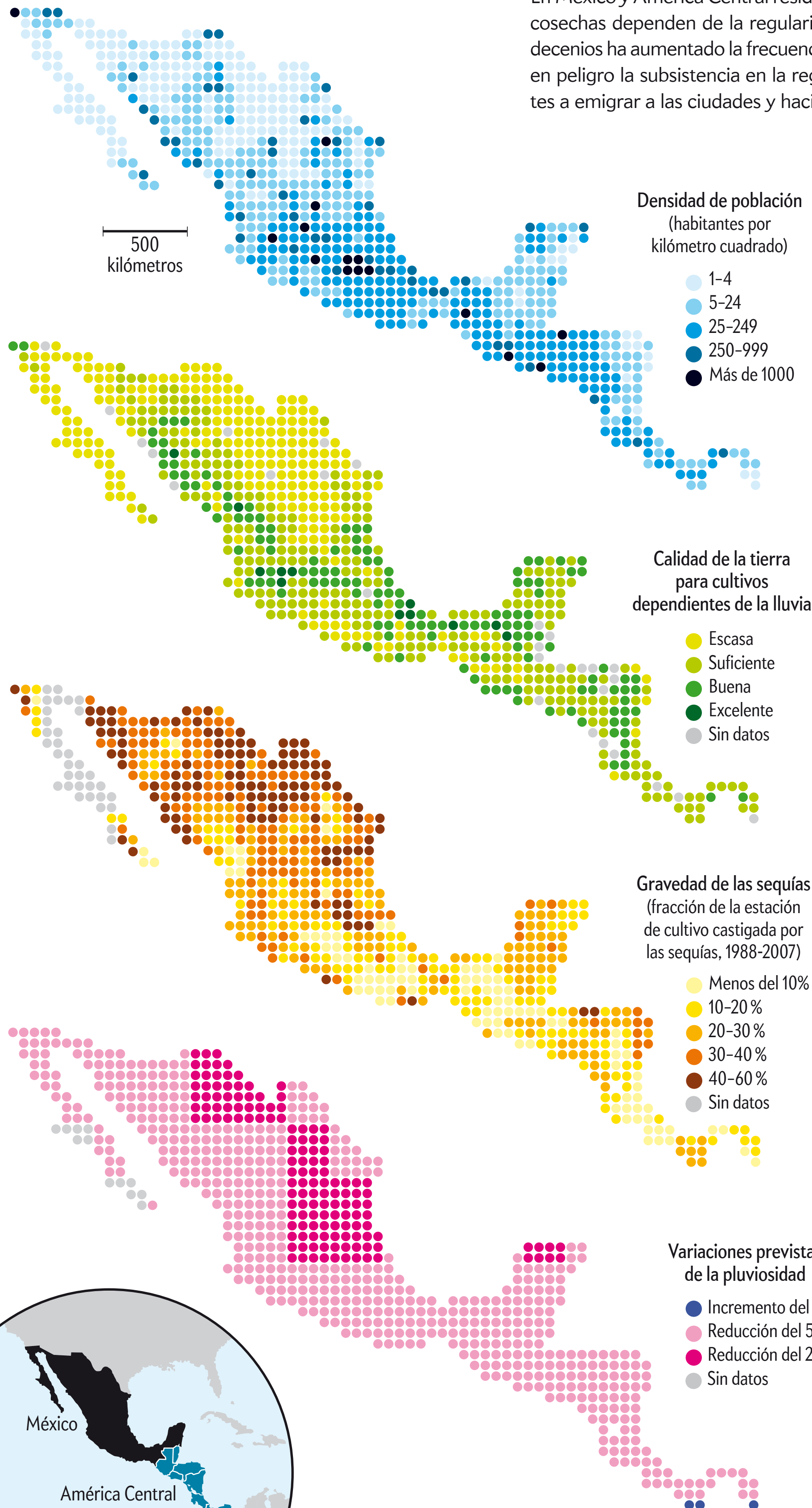
SOLUCIONES POLÍTICAS

¿Qué podemos hacer?

Es muy posible que las migraciones forzadas por el cambio climático se conviertan en el principal reto humanitario del siglo XXI. Cuando la población se vea obligada a desplazarse —ya sea por la elevación del nivel del mar o por otros fenómenos extremos—, la comunidad internacional tendrá que implantar medidas que garanticen migraciones ordenadas y pacíficas, el respeto a los derechos humanos y que los afectados tengan voz para decidir su futuro. Consideramos preciso actuar ya para prevenir las dificultades. Por ello, instamos a la comunidad internacional a que tome las medidas siguientes:

- Reducir las emisiones de gases de invernadero a valores seguros.
- Invertir en la gestión de prevención de desastres, que ha demostrado su eficacia para reducir la probabilidad de migraciones a gran escala.
- Asumir que un cierto volumen de migraciones será inevitable y desarrollar estrategias de adaptación, tanto a escala nacional como internacional.
- Establecer acuerdos de carácter vinculante que garanticen que los fondos destinados a la readaptación lleguen a quienes más los necesitan.
- Reforzar las instituciones internacionales dedicadas a velar por los derechos de los desplazados por el cambio climático.

En México y América Central residen millones de campesinos, cuyas cosechas dependen de la regularidad de las lluvias. En los últimos decenios ha aumentado la frecuencia de las sequías, lo que ha puesto en peligro la subsistencia en la región y ha obligado a sus habitantes a emigrar a las ciudades y hacia EE.UU.



Vida rural
Gran parte de la población de México reside en las regiones central y meridional, el cinturón agrícola del país.

El corazón de México
Las zonas irrigadas escasean. Gran parte de la agricultura de México y América Central depende en exclusiva de las precipitaciones.

Menos lluvias
En los últimos años gran parte de la región ha sufrido graves sequías.

Un futuro seco
Los modelos climáticos pronostican que, hacia 2080, buena parte de México se verá afectada por una importante disminución de las precipitaciones como consecuencia del cambio climático. En ciertas regiones, la pluviosidad total podría reducirse a la mitad.

FUENTES: CIESIN; IFPRI; BANCO MUNDIAL; CIAT; 2009 GRUMP, BETA VERSION: POPULATION DENSITY GRIDS; SEDAC (*densidades de población*); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION'S FGGD 2007 (*tierra para cultivos dependientes de la lluvia*); «IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON RIVER RUNOFF», DAISUKE NOHARA ET AL. EN ***JOURNAL OF HYDROMETEOROLOGY***, VOL. 7, Nº. 5, OCTUBRE DE 2006; DATOS OBTENIDOS POR LOS AUTORES EN COMUNICACIÓN PRIVADA (*variaciones previstas de la pluviosidad*); BRADFIELD LYON IRI/EARTH INSTITUTE, COLUMBIA UNIVERSITY; GPCC (*datos de pluviosidad*); IRI DATA LIBRARY (*sequías*)

Arantzazu Mascaraque y **Antonio Tejeda** son doctores en física por la Universidad Autónoma de Madrid. Mascaraque es profesora de la Universidad Complutense de Madrid, donde estudia las propiedades electrónicas en el grupo de fisicoquímica de superficies. Tejeda es investigador del Instituto Jean Lamour del CNRS francés. Ambos están interesados en las propiedades electrónicas de los sistemas de baja dimensionalidad.



MATERIALES

¿Aislante o metal?

La interacción entre electrones puede hacer que compuestos en principio metálicos se conviertan en aislantes. El comportamiento de estos materiales, los aislantes de Mott, guarda relación con el de los superconductores de alta temperatura

Arantzazu Mascaraque y Antonio Tejeda

Los metales son buenos conductores de la electricidad y el calor. Los aislantes, en cambio, no. Pensemos en un cable eléctrico: un cordón de hilos de cobre (metal) recubiertos de plástico (aislante). Sin embargo, la temperatura o la presión pueden convertir algunos metales en aislantes. Aunque ello no coincide con el sueño de los alquimistas de convertir el plomo en oro, se trata de un fenómeno incluso más sorprendente, debido a la diferencia en las propiedades de las dos sustancias.

Un aislante de Mott es precisamente un material que «debería» ser metálico pero presenta un comportamiento aislante. La temperatura o la presión puede transformarlo en metálico o viceversa: experimenta una transición de fase metal-aislante (transición de Mott). Los aislantes de Mott despiertan un gran interés debido a su parentesco con los superconductores de alta temperatura crítica; la comprensión de estos arrojaría luz sobre aquellos.

Muchas de las propiedades sorprendentes que muestran ciertos sistemas se deben a que estos presentan una disminución extrema de una de sus dimensiones espaciales. Las superficies ofrecen un ejemplo de reducción dimensional, puesto que una de sus dimensiones (el grosor) no es relevante en comparación con las otras dos. Dado que es de esperar que una dimensionalidad reducida afecte también a las propiedades de los aislantes de Mott, en nuestro grupo hemos investigado la transición metal-aislante en un sistema superficial formado por estaño y germanio (Sn/Ge). El estudio del comportamiento de los electrones y de la estructura de la red cristalina nos ha permitido ahondar en la comprensión de estos interesantes materiales anómalos.

MODELOS TEÓRICOS

Antes de presentar los resultados de nuestra investigación, conviene recordar la evolución de las teorías que han descrito las propiedades de los metales. El primer modelo se desarrolló a partir del descubrimiento del electrón. Paul Drude (1900) propuso que los electrones más alejados de los núcleos atómicos se movían libremente en el sólido, como las moléculas en un gas. Este «modelo del gas de electrones libres» suponía que los electrones externos estaban poco afectados por los otros electrones. Sin embargo, predecía que el calor específico electrónico (variación de la energía de los electrones al cambiar la temperatura) era constante. Lo cual es falso.

EN SÍNTESIS

La teoría de bandas falla al describir los aislantes de Mott, materiales en principio metálicos que se comportan como aislantes.

Las propiedades conductoras de estas sustancias varían en función de la temperatura, la presión y el dopado. Estos factores modifican la interacción electrostática de los electrones, que dejan de comportarse como partículas libres.

Dado que algunos superconductores de alta temperatura corresponden a aislantes de Mott dopados, la comprensión del comportamiento de estos arrojaría luz sobre la superconductividad.

Los autores han observado la primera transición de Mott en una intercara de estaño y germanio. El sistema se ha convertido en un modelo para el estudio de superficies con correlación electrónica.

ALBERT MARÍN/INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Más adelante, Arnold Sommerfeld (1927) mejoró el modelo clásico mediante la introducción de la mecánica cuántica. La consideración del electrón como una partícula cuántica (fermión sujeto al principio de exclusión de Pauli) permitió predecir correctamente las propiedades térmicas más importantes, entre ellas la dependencia del calor específico con la temperatura.

Felix Bloch (1928) dio el último paso en la descripción de los metales: incluyó el concepto de red cristalina. En los metales cristalinos, los electrones se ven afectados por el campo eléctrico asociado a los iones positivos que forman la red. Este campo eléctrico puede considerarse pequeño y periódico, por lo que su tratamiento matemático se simplifica. Bloch desarrolló el «modelo de electrones cuasi-libres», basado en un gas de electrones sin influencia mutua (electrones independientes) en un campo eléctrico periódico y débil (electrones cuasi-libres). Describía bastante bien el movimiento de los electrones en el sólido y, en particular, su propiedad más importante: la energía.

Los niveles de energía de los electrones en un sólido se distribuyen en bandas, que pueden considerarse resultado de la superposición de los estados atómicos que integran la red. Estas reflejan el hecho de que los electrones pueden desplazarse a lo largo de todo el material: pertenecen al sólido, no a un átomo concreto. Las bandas se llenan comenzando por los estados de menor energía. El número máximo de electrones que puede ocupar una banda es igual al que cabría en todos los orbitales atómicos que se han superpuesto para crear la banda. Dado que en cada orbital atómico caben dos electrones (cada uno con diferente espín), en cada banda caben dos electrones por átomo. El nivel de energía más alto ocupado corresponde al nivel de Fermi. Conocer en detalle los estados que existen en el nivel de Fermi resulta básico para entender el comportamiento electrónico del sistema. Solo los electrones próximos al nivel de Fermi cuentan con estados vacíos accesibles; solo ellos pueden interactuar con el exterior mediante el intercambio de energía.

Los metales se caracterizan porque poseen bandas que no están completamente llenas. Así, cuando se aporta cierta energía al sistema, los electrones del nivel de Fermi ascienden un estado energético dentro de su banda que antes estaba vacío. Este nuevo estado permite un aumento de la energía cinética, lo que se traduce en la posibilidad de desplazarse por el cristal. Los aislantes, en cambio, tienen la última banda completamente ocupada. Por ello, sus electrones no pueden alcanzar tan fácilmente la banda desocupada más cercana: necesitan una energía al menos tan grande como la diferencia de energía entre dos bandas consecutivas.

El concepto de nivel de Fermi resulta tan útil que se extiende incluso a los aislantes. En estos materiales, el nivel de Fermi se encuentra dentro del rango de energía prohibida: entre la última banda completamente ocupada y la primera completamente vacía. El estudio del mismo sirve para diferenciar la naturaleza eléctrica de un material: los metales son materiales que tienen electrones en el nivel de Fermi, mientras que los aislantes carecen de ellos. Por tanto, la medida experimental de los estados electrónicos del nivel de Fermi nos permite determinar si un material es metálico (conductor) o aislante.

Pero, ¿funciona siempre este modelo? En 1937, Jan Hendrik de Boer y Evert J. Willem Verwey señalaron que ciertos óxidos de metales de transición como el óxido de níquel (NiO), con bandas parcialmente llenas, eran malos conductores de la electricidad e incluso aislantes. Este hallazgo, que ponía en tela de juicio la teoría de bandas para este tipo de compuestos, fascinó a los físicos y conllevó el desarrollo de una nueva teoría.

ELECTRONES CORRELACIONADOS

Sabemos ahora que el NiO es un aislante de Mott. Con este nombre se denominan ciertos materiales que, si bien la teoría de bandas predice que deben ser conductores, no conducen la electricidad. Deben su nombre a Nevill Mott, quien estudió la transición metal-aislante en un artículo publicado en 1949. Si la teoría de bandas no explica las propiedades electrónicas de los aislantes de Mott es porque supone que los electrones son independientes. Sin embargo, los electrones sí se afectan unos a otros: se repelen fuertemente debido a la fuerza culombiana entre cargas del mismo signo. Y en ciertas ocasiones esta interacción no puede ignorarse. Decimos entonces que existe correlación electrónica. De hecho, la correlación electrónica puede llegar a ser la responsable de las principales propiedades físicas del material.

Podríamos explicar este comportamiento aislante «inesperado», aunque solo de forma cualitativa, a partir de la repulsión electrostática entre cargas del mismo signo. Los electrones tenderían a localizarse alrededor de un átomo y a reducir su movilidad para no interactuar con otros electrones.

HISTORIA

Sir Nevill Mott

El físico teórico Nevill Mott nació en Leeds en 1905. Recibió el Premio Nobel en 1977, junto a P. W. Anderson y J. H. Van Vleck, por «sus investigaciones teóricas fundamentales de la estructura electrónica de sistemas magnéticos y desordenados». Durante veinte años dirigió la cátedra de física teórica de la Universidad de Bristol, hasta que en 1953 recibió una oferta de Cambridge para suceder a W. H. Bragg al frente de la cátedra del Instituto Cavendish de Ciencias Experimentales. Fue uno de los primeros en proponer que físicos teóricos y experimentales trabajaran juntos en la resolución de los problemas científicos.



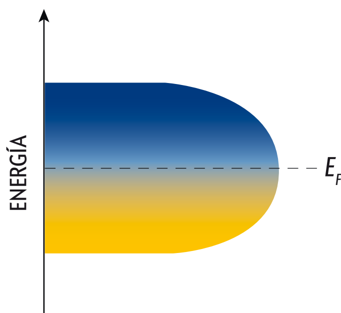
Su trabajo se dedicó sobre todo al estudio de la aplicación de la mecánica cuántica a los sólidos. Publicó su primer artículo en 1927, en los albores de la física cuántica, y el último en 1996, sobre superconductividad a alta temperatura, cuatro meses antes de morir a los 90 años. Su apellido da nombre a numerosas ideas y conceptos de la física moderna. Según sus colaboradores, su talento para visualizar el sólido como un conjunto de átomos y ondas electrónicas hacía que fuera capaz de predecir los mismos resultados que otros obtenían tras complejos cálculos matemáticos.

PHYSICS PORTRAIT GALLERY, UNIVERSIDAD DE BRISTOL

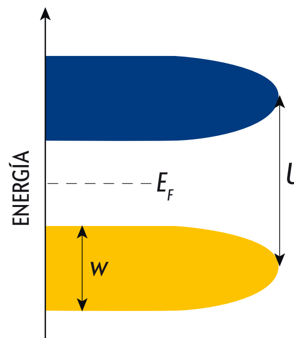
Metales que no son metales

La conductividad de un material viene determinada por el nivel de Fermi (E_F) y la estructura de bandas electrónicas. Los niveles energéticos desocupados más bajos conforman la banda de conducción (*azul*); los niveles ocupados de mayor energía, la banda de valencia (*naranja*). En los metales, el nivel de Fermi corresponde al nivel energético más alto ocupado; la banda de conducción y la de valencia se solapan. En los aislantes, en cambio, el nivel de Fermi se halla vacío, en medio de una brecha energética que impide el paso de los electrones de una banda a otra.

En ocasiones, la conductividad se ve alterada por los fenómenos de repulsión electrónica. Ciertos materiales que deberían ser metálicos por tener su última banda a medio ocupar se comportan como aislantes porque la energía asociada a la repulsión electrostática entre partículas del mismo signo (U) es mayor que la anchura energética de la banda (W). En estas condiciones de fuerte correlación electrónica, la banda inicial se desdobla en dos: una banda ocupada y otra vacía. Los sistemas en donde la repulsión es tan fuerte que deberían ser metales pero son aislantes se denominan aislantes de Mott.



Metal
Al poseer bandas medio llenas, los electrones del nivel de Fermi pueden ascender a un estado energético dentro de su banda que antes estaba vacío. Ello se traduce en un aumento de la energía cinética y, por tanto, en una mayor facilidad para desplazarse por el cristal.



Aislante de Mott
Al tener la última banda completamente ocupada, sus electrones no pueden alcanzar tan fácilmente la banda de conducción: necesitan una energía al menos tan grande como la diferencia de energía entre dos bandas consecutivas.

Mott explicó el comportamiento de esos compuestos mediante la variación de la presión. Supongamos que aplicamos a un metal una presión «negativa» que separa sus átomos. Este aumento de la distancia reduce la interacción entre los electrones, lo que puede afectar drásticamente al equilibrio energético. Si la separación de los átomos es suficientemente grande, los electrones dejarán de interactuar unos con otros y el sistema se aproximará más a un conjunto de átomos aislados, donde cada electrón se aloja alrededor de un átomo, que a un metal, donde los electrones se mueven por todo el material.

Sin embargo, desde un punto de vista experimental, la manera más sencilla de modificar la interacción entre electrones es a través de cambios de temperatura. En una conferencia celebrada en Londres en 1937, Rudolf Ernest Peierls propuso que la fuerza culombiana entre electrones podría llegar a localizarlos alrededor de los átomos. En algunas situaciones, al bajar la temperatura, los electrones reducen su movilidad y pasan más tiempo cerca de sus iones. De esta forma, aquellos que saltan a otro ion lo encuentran seguramente ocupado por otro electrón, que lo repele, dificultando el movimiento de los electrones por el material.

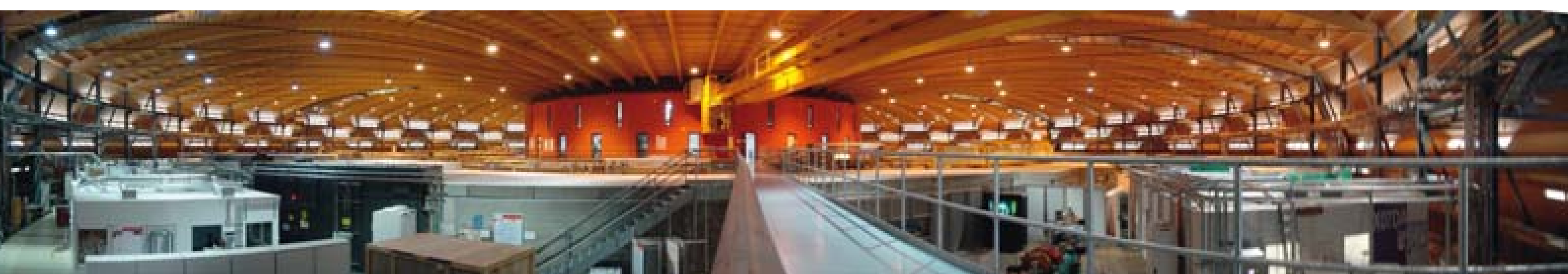
Por último, cabe citar el efecto de la concentración de carga (dopado). La introducción de un elemento dopante altera la concentración de portadores de carga; ello afecta a la capacidad del sistema para apantallar la interacción electrostática y, por tanto, incrementa los efectos debidos a la correlación electrónica. De ahí que desempeñe una función en la transición de metal a aislante. La influencia de estos tres factores (presión, temperatura y dopado) ha sido analizada en la transición metal-aislante que sufre el óxido de vanadio volúmico (V_2O_3), uno de los aislantes de Mott más estudiados.

AISLANTES DE MOTT BIDIMENSIONALES

Para el estudio de la física de los aislantes de Mott, resultan de gran interés las superficies: al tener una de las tres dimensiones espaciales muy reducida, facilitan el confinamiento de los electrones. Sin embargo, la investigación con superficies de este tipo entraña una gran dificultad experimental; para mantenerlas limpias es necesario trabajar en condiciones de vacío extremo (ultra-alto vacío), lo que dificulta su manipulación. Con todo, la física de superficies cuenta en la actualidad con las técnicas necesarias para realizar este tipo de experimentos.

Unos buenos candidatos a aislantes de Mott bidimensionales son las superficies semiconductoras. Dado que sus bandas electrónicas son estrechas en energía, los electrones se hallan ya bastante localizados, por lo que puede esperarse que la repulsión culombiana afecte de forma notable al sistema. La búsqueda de aislantes de Mott en superficies semiconductoras comenzó en los años noventa del siglo pasado. Durante años se encontraron solo dos compuestos: una variedad del carburo de silicio (SiC) y el propio silicio dopado con boro y potasio (K/Si:B, con el dopaje se obtiene una banda medio llena). Sin embargo, en 2006 nuestro grupo descubrió una nueva transición metal-aislante en una intercara (superficie límite entre dos fases) de germanio (Ge) y estaño (Sn). Al cubrir con átomos de estaño la superficie de un cristal de germanio obtuvimos un sistema Sn/Ge, que, siendo un metal a temperatura ambiente, se convertía en un aislante de Mott al bajar la temperatura.

Mediante el microscopio de efecto túnel de la Universidad de Nancy observamos la superficie que se formaba al depositar un tercio de capa atómica de Sn sobre Ge. Puesto que este microscopio permitía variar la temperatura de la muestra entre la



Sincrotrón del Instituto Paul Scherrer (Swiss Light Source), cerca de Zúrich, donde se han realizado los experimentos de fotoemisión.

del helio líquido (4 K) y la temperatura ambiente, pudimos estudiar los cambios de posición que sufrían los átomos de Sn al enfriar el sistema.

Para lograr una energía y reactividad mínimas, los átomos de una superficie a menudo se reorganizan en «reconstrucciones». Cuando se deposita una capa atómica sobre una superficie, la celda unidad resultante (conjunto mínimo de átomos que describen la totalidad de la superficie por repetición) suele ser un múltiplo de la original; se describe mediante los valores x e y por los que se ha multiplicado la celda original. El sistema Sn/Ge que estudiamos presenta una reconstrucción (3×3) en un rango de temperaturas de entre 150 y 30 K. Ello implica que la celda unidad es tres veces mayor en cada dirección que la celda unidad del Ge de partida. Esta reconstrucción espacial posee tres átomos de Sn por cada celda unidad. Pero los tres átomos de Sn no se hallan a la misma altura sino que uno de ellos está en una posición más elevada que los otros dos, algo más bajos. A esta estructura superficial se la conoce como modelo «1 arriba –2 abajo».

La posición de los átomos de Sn reviste suma importancia para las propiedades electrónicas del material, puesto que una modificación de la geometría de la red cristalina afecta directamente a la estructura de bandas. Las estructuras cristalina y electrónica se hallan acopladas. La diferencia de altura entre los átomos de Sn refleja la transferencia de carga electrónica que se produce entre estos y los átomos de Ge con los que se enlazan. Al trasferirse carga de un átomo de Sn a otro a través de los átomos de Ge vecinos, el Sn donador se asemeja a un átomo con tres electrones de valencia; ello hace que prefiera un entorno geométrico en el que los enlaces y el ion de Sn se disponen en el mismo plano (como si los enlaces apuntaran hacia los vértices de un triángulo). El Sn receptor, en cambio, lo mismo que un átomo con cuatro electrones de valencia, buscará una geometría que le permita ocupar el centro de un tetraedro. El resultado es una disposición geométrica donde los átomos de Sn se encuentran a distinta altura y la carga se transfiere de los átomos inferiores a los superiores.

Al disminuir la temperatura hasta unos 30 K, la disposición de los átomos de Sn en la superficie se transforma completamente. Aparece una nueva reconstrucción. Los átomos de Sn, que en la fase (3×3) estaban a alturas diferentes, se disponen todos en el mismo plano. La simetría de la superficie se ve modificada y la celda unidad pasa a tener solo un átomo de Sn en una estructura que se conoce como $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$R30º. Con el propósito de descubrir el mecanismo que subyace bajo esta transición de fase, hemos estudiado la transformación que sufre una zona de la superficie conforme desciende la temperatura.

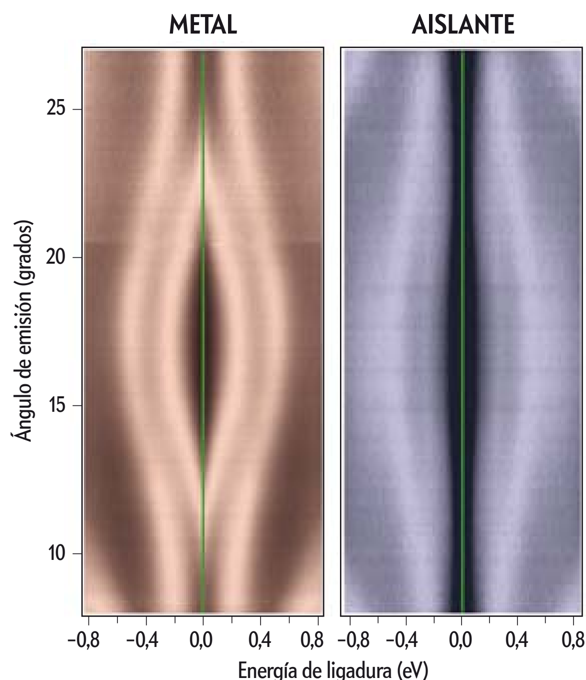
Para determinar la altura de los átomos de Sn en una fase hay que fijar un origen de coordenadas. En nuestro sistema, hemos usado como punto de referencia los defectos naturales preexistentes en la superficie, dado que la altura de los mismos no cambia durante la transición. De este modo, hemos determinado que la altura de los átomos de Sn a baja temperatura en la reconstrucción $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$R30º a temperaturas menores de 30 K se halla entre las alturas de los dos tipos de átomos de la reconstrucción (3×3).

La celda unidad de la fase $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$R30º contiene un solo átomo de Sn, que aporta un electrón. Dado que el número total

TRANSICIÓN

De metal a aislante

La estructura de bandas de un sistema puede estudiarse mediante fotoemisión. Se ilumina la muestra con una luz de energía determinada, que, por efecto fotoeléctrico, extrae electrones. Estos abandonan el material con energías y ángulos que dependen de su estado en el interior del sólido. De este modo, la caracterización del electrón en el exterior del material permite determinar el estado del que proviene en el interior del mismo y, por tanto, conocer la estructura de bandas.



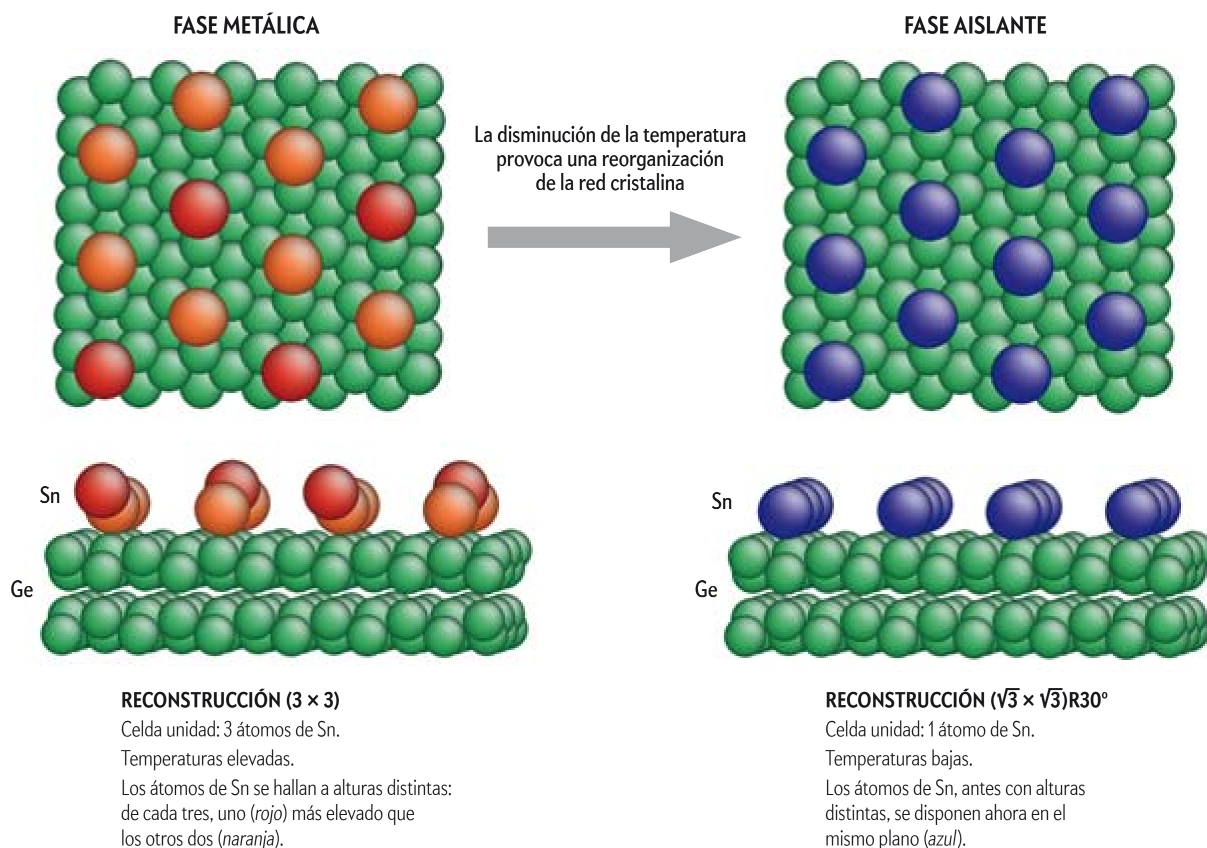
Se ha determinado mediante fotoemisión la estructura de bandas del sistema Sn/Ge y su variación con la temperatura. A 140 K (*izquierda*), el material muestra un comportamiento metálico: se observa una banda (*zona brillante*) que llega al nivel de Fermi (*verde*). A 12 K (*derecha*), el material se torna aislante: la banda que cortaba el nivel de Fermi ha desaparecido.

WIKIMEDIA COMMONS/HABI (*arriba*); ARANTZAZU MASCARAQUE Y ANTONIO TEJEDA (*abajo*)

ESTRUCTURA CRISTALINA

Transición estructural

La estructura cristalina reviste suma importancia para las propiedades electrónicas de un material, puesto que una modificación de la geometría de la red afecta directamente a la estructura de bandas. La estructura cristalina y la electrónica se hallan, pues, acopladas. Esta dependencia se observa en el sistema Sn/Ge, una superficie de germanio (Ge, *verde*) recubierta con átomos de estaño (Sn, *rojo y naranja, o azul*). Al descender la temperatura, el material sufre una reorganización estructural que lo convierte en aislante.



RECONSTRUCCIÓN (3 × 3)
Celda unidad: 3 átomos de Sn.
Temperaturas elevadas.
Los átomos de Sn se hallan a alturas distintas: de cada tres, uno (*rojo*) más elevado que los otros dos (*naranja*).

RECONSTRUCCIÓN ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°
Celda unidad: 1 átomo de Sn.
Temperaturas bajas.
Los átomos de Sn, antes con alturas distintas, se disponen ahora en el mismo plano (*azul*).

de electrones en la celda unidad es impar, el sistema tiene una banda parcialmente llena. Según la teoría de bandas, debería ser metálico. Sin embargo, los datos experimentales obtenidos mediante espectroscopia de fotoemisión indican lo contrario. En la espectroscopia de fotoemisión, la luz que se envía a la muestra arranca electrones por efecto fotoeléctrico. El análisis del número de electrones que abandonan la muestra (intensidad) en función de su energía y del ángulo de escape permite obtener el diagrama de estados electrónicos del sistema. Los experimentos de fotoemisión se realizaron en el sincrotrón suizo cerca de Zúrich (Swiss Light Source), que ofrece la posibilidad de realizar fotoemisión resuelta en ángulo a 10 K. Ello nos permitió obtener la estructura de bandas del sistema en función de la temperatura y, en particular, la evolución de la región próxima al nivel de Fermi.

Por encima de 30 K, existe una banda parcialmente ocupada; ello se pone de manifiesto por la presencia de intensidad electrónica en el nivel de Fermi. A esa temperatura el sistema es, por tanto, metálico, como predice la teoría de bandas para la fase (3 × 3). Cuando la temperatura disminuye, en cambio, desaparecen los estados en torno al nivel de Fermi: aparece una zona de energía prohibida. El sistema se convierte en aislante. Puesto que el número de electrones del sistema no cambia por variar la temperatura, se concluye que la superficie ha experimentado una transición metal-aislante. Pero, ¿qué ha ocurrido realmente en el material?

DE METAL A AISLANTE

Se conocen varias transiciones metal-aislante. Cada una se debe a una causa distinta. En la transición de Anderson, un sistema originalmente metálico se torna aislante porque el desorden estructural atrapa a los electrones e impide que se muevan por el cristal. Sin embargo, las imágenes de microscopía túnel del sistema Sn/Ge muestran que los defectos superficiales que existen de forma natural no desempeñan ninguna función en la transición de fase. Al estudiar la variación de una misma región de la superficie en función de la temperatura hemos analizado el comportamiento de varios defectos debidos a átomos de Sn que son sustituidos por átomos de Ge y otros defectos que corresponden a la ausencia de Sn (vacantes de Sn). Y hemos observado que estos defectos no aumentan en número ni varían su posición en la superficie. Actúan únicamente a modo de centros de nucleación de las fases cuando se inicia la transición, pero no son imprescindibles para la misma. Por tanto,

ARANTZAZU MASCARAQUE Y ANTONIO TEJEDA

la transición de Anderson no explica los resultados de nuestros experimentos.

Otras transiciones de fase metal-aislante se asocian a deformaciones de la red cristalina. Por botón de muestra, los aislantes de Peierls. En estos materiales, la red se deforma para disminuir la energía electrónica del sistema. La transición está ligada a una distorsión geométrica particular asociada con la periodicidad del cristal. Debido a dicha distorsión, que cambia la celda unidad de la superficie, la estructura electrónica se modifica, porque debe adaptarse a la nueva geometría. En la nueva estructura de bandas los electrones pasan a llenar completamente una banda (aislante) que antes estaba medio llena (metal), por lo que deja de haber intensidad en el nivel de Fermi. El balance energético final, es decir, el cambio estructural más la modificación de la energía de los electrones, resulta favorable porque en la nueva estructura electrónica los electrones ocupan estados electrónicos de menor energía. La disminución de la energía electrónica compensa la energía que se necesita para distorsionar la red.

Sin embargo, al estudiar las propiedades electrónicas de la fase de alta temperatura en el sistema Sn/Ge no hemos observado dicha disposición especial de la estructura de bandas. Además, en los aislantes de Peierls la celda unidad de la superficie a baja temperatura es siempre de mayor tamaño que la de alta temperatura. En cambio, en nuestro caso ocurre justamente lo contrario: la celda (3×3) de alta temperatura es mayor que la celda $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$R30º de la fase de baja temperatura. Por tanto, puede descartarse que en el sistema Sn/Ge se produzca una transición de tipo Peierls.

Llegamos, por fin, a la transición de Mott. En efecto, el sistema Sn/Ge posee todas las características propias de una transición de Mott: existe una transición metal-aislante en la que hemos podido estudiar la fase metálica y la fase aislante, la redistribución de la intensidad electrónica en el nivel de Fermi no está relacionada con la periodicidad de la superficie sino que es uniforme y la dimensión de la zona de energía prohibida que se abre queda dentro de lo esperable.

En el sistema Sn/Ge pueden estudiarse las transiciones de fase metal-aislante con mayor facilidad que en el carburo de silicio y el silicio dopado con boro y potasio, los otros candidatos a aislantes de Mott. En el SiC no existe unanimidad acerca de si la transición de Mott sucede o no. En el caso del K/Si:B, si bien se acepta la existencia de una fase aislante de Mott, el sistema se encuentra ya en esa fase a temperatura ambiente; y dado que se destruye al calentarlo, no se ha podido observar la transición de fase metal-aislante.

ORIGEN DE LA TRANSICIÓN

El mecanismo que origina la transición de fase en la capa Sn/Ge debe modificar la energía libre del sistema en función de la temperatura de manera que aparezca un nuevo mínimo correspondiente a la estructura plana de la fase Mott. Ese mecanismo provoca que los efectos de correlación electrónica cobren mayor importancia. Habría dos explicaciones alternativas.

En un principio podría pensarse que el origen de la transición guarda relación con la energía elástica y con el cambio del signo del coeficiente de dilatación que tiene lugar en el germanio a 30 K. Pero la modificación del parámetro de red debida a este cambio es muy pequeño e insuficiente para modificar el equilibrio de la fase (3×3) y desencadenar la transición de Mott.

Otra posibilidad sería que la transición estuviera relacionada con la modificación del apantallamiento electrónico. Al

MICROSCOPÍA

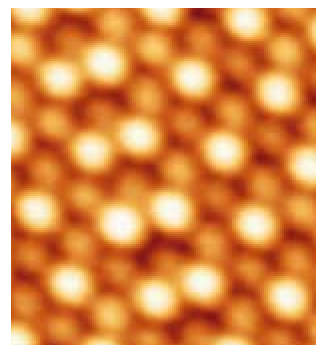
Imágenes con resolución atómica

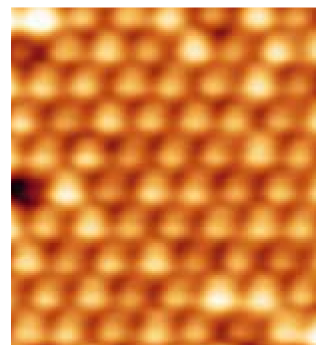
El microscopio de efecto túnel permite estudiar la topografía de una superficie a escala atómica. Este dispone de una punta muy afilada, que se mueve sobre la superficie sin entrar en contacto físico con ella. El movimiento se realiza con precisión atómica gracias a unos actuadores piezoeléctricos. Se establece luego una diferencia de potencial entre la punta y la superficie, y se produce una corriente de origen cuántico. Los electrones responsables de esta corriente atraviesan, por efecto túnel, la distancia entre la punta y la muestra. El sistema de control por ordenador del microscopio actúa de forma que la corriente que circula entre ambas sea constante en todo el movimiento de exploración de la superficie, de modo que cuando la punta se halla sobre un agujero tenderá a desplazarse hacia la muestra para evitar que disminuya la corriente. Así, para lograr que la corriente sea constante, la punta debe alejarse o acercarse a la superficie, por lo que su movimiento se corresponderá con la topografía de la superficie. Dado que el efecto túnel depende exponencialmente de la distancia entre la punta y la muestra, podemos determinar la topografía de la superficie con una resolución vertical extrema.

En realidad, este instrumento no proporciona un mapa de las posiciones atómicas propiamente dichas (coordenadas del centro del núcleo), sino que explora la densidad electrónica de la superficie (extrae o inyecta electrones en los estados electrónicos). Sin embargo, puesto que la densidad electrónica de superficie y las posiciones atómicas suelen estar relacionadas, se considera que este microscopio permite «ver» los átomos.



Cabeza del microscopio de efecto túnel.





Microscopías de efecto túnel (4 × 4 nanómetros) de una capa atómica de estaño (monocapa) sobre un sustrato de germanio. A 130 K, los átomos de estaño de la superficie tienen dos alturas diferentes, por lo que se observan con dos intensidades (*arriba*). A 12 K, todos los átomos se disponen a la misma altura y por ello aparecen todos con la misma intensidad (*abajo*).

ARANTZAZU MASCARAQUE Y ANTONIO TEJEDA



Microscopio de efecto túnel del grupo de física de la nanoescala de la Universidad de Nancy. Se trata de uno de los pocos sistemas experimentales en el mundo que permite el estudio simultáneo de la estructura cristalina y electrónica de superficies sin necesidad de exponer la muestra a presión atmosférica. Asimismo, opera en un rango de temperaturas que va desde la ambiental hasta 4 K. Consta de tres campanas de ultra-alto vacío, interconectadas pero independientes, dotadas de técnicas propias. Un sistema de transferencia permite desplazar la muestra de una campana a otra.

ARANTZAZU MASCARAQUE Y ANTONIO TEJEDA

disminuir la temperatura, se reduce el número de electrones térmicamente excitados, por lo que disminuye también la facilidad con que los electrones pueden apantallar la carga. Ello implica un aumento de la repulsión electrónica efectiva y, por tanto, una modificación en la intensidad de las correlaciones electrónicas que puede dar lugar a la estabilización de una fase Mott.

El mecanismo que desencadena la transición debe afectar a la estructura de la superficie, que se modifica a lo largo de la transición, así como al comportamiento electrónico, que pasa de metal a aislante. El grupo de Fernando Flores, de la Universidad Autónoma de Madrid, especializado en cálculos teóricos de sistemas bidimensionales, centra parte de su labor en el estudio de las correlaciones electrónicas. A partir de los cálculos que han realizado para esta superficie, hemos determinado que los efectos de correlación electrónica desencadenan, en efecto, la transición.

El mecanismo es complejo e implica la formación de una fase intermedia entre la fase metálica (3 × 3) y la fase aislante de Mott. En un primer paso, la congelación térmica de vibraciones atómicas facilita la localización de la carga en la estructura (3 × 3). Aparece así una fase intermedia, que hemos podido estudiar también experimentalmente mediante microscopía de efecto túnel y fotoemisión. En esta fase intermedia la interacción entre electrones da lugar a un ordenamiento de la carga dentro de la celda (3 × 3), que afecta a la zona cercana al nivel de Fermi, reduce la conductividad y modifica las alturas de los átomos de Sn. Esta fase (3 × 3) con reordenamiento de carga es la precursora de la fase aislante de Mott. En un segundo paso, desaparece la distorsión asociada a la estructura (3 × 3); se forma una fase plana, que corresponde a la fase aislante de Mott.

En la actualidad estudiamos la estabilidad de la fase aislante de Mott frente a cambios en la temperatura y la densidad electrónica. Ello nos permitirá ahondar en la comprensión de las fases metálicas que se encuentran en condiciones cercanas a las que dan lugar a un aislante de Mott. En estas tienen lugar fenómenos complejos tales como las fluctuaciones de espín o de carga, y efectos de correlaciones fuertes de electrones.

Una de las fases relacionadas con los aislantes de Mott de mayor interés son los superconductores de alta temperatura. La superconductividad de alta temperatura, tras descubrirse en 1986, continúa siendo un misterio para los físicos [*véase* «Claves de la superconductividad a altas temperaturas», por Graham P. Collins; Investigación y Ciencia, octubre de 2009]. Sorprendentemente, algunos superconductores de alta temperatura se obtienen mediante el dopado de un aislante de Mott, es decir, a través de la introducción o eliminación de electrones en el aislante.

El caso mejor conocido es el de la familia de cupratos superconductores formados por el apilamiento de capas de oxígeno y cobre, donde existe una interacción débil entre dichas capas. Aunque se trata de sistemas tridimensionales, guardan una gran semejanza con sistemas de menor dimensionalidad. En estos materiales, las capas de oxígeno y cobre deberían ser, según la teoría de bandas, metálicas. Sin embargo, debido a la correlación electrónica, se comportan como aislantes de Mott. Esperamos, por tanto, que la comprensión de intercaras como el Sn/Ge arroje luz sobre las propiedades superconductoras de dichos materiales.

Desde un punto de vista más fundamental, la relevancia de los resultados obtenidos en el Sn/Ge radica en el hecho de que la observación y el análisis de una transición de Mott permite ahondar en la compresión de las complejas propiedades que aparecen en sistemas que no «siguen» la teoría de bandas clásica. Un sistema en el que cambios tan pequeños pueden transformarlo de metálico en aislante resulta ideal para modelar sus propiedades, ya que la ingeniería de superficies ha alcanzado una capacidad de manipulación difícil de obtener en el caso de los compuestos tradicionales.

Más allá de esas motivaciones básicas, nuestro trabajo entraña un interés particular porque se centra en una transición de Mott en superficie. La transición de fase proporciona mucha más información que la propia fase Mott. El análisis de la transición nos permitirá averiguar si esta varía según si el aislante de Mott es bidimensional, como en las superficies, o tridimensional, como en los materiales más usuales.

Cada nuevo hallazgo plantea nuevas cuestiones. Nos queda todavía un largo camino por recorrer hasta que podamos predecir el comportamiento de un material determinado. Con todo, la comprensión de las propiedades de sistemas modelo cada vez más complejos está permitiendo avanzar en la dirección correcta.

PARA SABER MÁS

When is a metal not a metal? S. C. Erwin, en *Nature*, vol. 441, n.º 295, 2006.
Observation of a Mott insulating ground state for Sn/Ge(111) at low temperature. R. Cortés, et al. en *Physical Review Letters*, vol. 96, pág. 126.103, 2006.
Structural Origin of the Sn 4d Core Level Line Shape in Sn/Ge(111)-(3×3). A. Tejeda, et al. en *Physical Review Letters*. vol. 100, pág. 026.103, 2008.
Superconductivity in one-atomic-layer metal films grown on Si(111). T. Zhang et al. en *Nature Physics*, vol. 6, pág. 10, 2010.
Large Rashba spin splitting of a metallic surface-state band on a semiconductor surface. K. Yaji et al. en *Nature Communications*, 1:17, DOI:10.1038/ncomms1016, 2010.



Ross D. King es profesor de computación en la Universidad de Aberystwyth. Investiga cuestiones relativas a la actividad científica, entre las que se incluyen métodos para aplicar la computación a la química y la biología.



COMPUTACIÓN

Robots científicos

Conciben hipótesis, realizan experimentos para verificarlas y evalúan los resultados. Todo ello sin intervención humana

Ross D. King

¿Pueden automatizarse los descubrimientos científicos? Con ello no nos referimos a automatizar los experimentos. Nos preguntamos sobre la posibilidad de construir una máquina (un «robot científico») que lleve a cabo todo el proceso que aporta nuevos conocimientos a la ciencia. Nuestro grupo de investigación lleva un decenio tratando de desarrollar una.

A ello nos mueven dos finalidades. La primera, comprender mejor la ciencia. Tal y como sostenía el físico y premio nóbel Richard Feynman, es imposible entender aquello que no podemos crear. Construir un robot científico nos obliga a tomar decisiones de ingeniería que tengan en cuenta los mecanismos que intervienen en la formulación de hipótesis, la relación entre objetos físicos y conceptos abstractos, y la existente entre los fenómenos observados y su formulación teórica.

Nuestra segunda motivación es de carácter técnico: máquinas de ese tipo posibilitarían una investigación más productiva y rentable. Hoy, la complejidad de algunas cuestiones científicas alcanza tales niveles que no existen suficientes expertos en el mundo para abordarlas. En esos casos, las mayores esperanzas residen en un tratamiento automatizado.

Los recursos informáticos destinados a la investigación científica han experimentado mejoras constantes. Consideremos la automatización de laboratorios gracias a las técnicas de cribado de alto rendimiento y sus aplicaciones a la secuenciación del ADN o la selección de fármacos, los ordenadores que automatizan el análisis de datos y que ya comienzan a formular hipótesis, o los programas de aprendizaje automático que se emplean en el diseño de fármacos. El objetivo de un robot científico consiste en combinar todas esas técnicas para automatizar el proceso completo: formular hipótesis, concebir y realizar experimentos que las sometan a prueba y repetir el ciclo hasta producir nuevos conocimientos. ¿Es posible construir una máquina semejante? Dos robots diseñados por nuestro laboratorio, así como otros en todo el mundo, sugieren una respuesta afirmativa.

EXPERIMENTOS CON LEVADURAS

Las primeras aplicaciones de la inteligencia artificial a los descubrimientos científicos se desarrollaron en la Universidad de Stanford durante los decenios de 1960 y 1970. Se diseñó un programa, DENDRAL, que analizaba los datos obtenidos por un espectrómetro de masas; el programa asociado, Meta-DENDRAL,

EN SÍNTESIS

La complejidad de algunos problemas científicos es tal que el diseño y la realización de los experimentos necesarios para solucionarlos requieren una cantidad prohibitiva de tiempo.

Los robots científicos podrían llenar ese vacío. Adam, un prototipo, formula hipótesis sobre las funciones de los genes de la levadura *S. cervisiae* y concibe experimentos para verificarlas.

Mediante la inteligencia artificial y un equipo robótico, Adam descubrió los tres genes que codifican cierta enzima de la levadura, un resultado que había escapado a los científicos.

Los críticos sostienen que Adam no es un científico, pues requiere intervención humana. Aun así, una colaboración entre robots y humanos daría mejores resultados que cualquiera de ellos por separado.

DAVID JOHNSON

fue uno de los primeros sistemas de aprendizaje automático. El objetivo consistía en fabricar instrumentos que permitiesen a la misión Viking, de la NASA, explorar las posibles señales de vida en Marte. Por desgracia, la tarea se encontraba más allá de los recursos técnicos de la época.

Desde entonces, programas como Prospector (en geología), Bacon (genérico) y sus sucesores han automatizado tareas como el planteamiento de hipótesis y su comprobación experimental. Sin embargo, la mayoría de esos sistemas carece de la capacidad para realizar sus propios experimentos. Ello supone un requisito esencial que ha de satisfacer todo sistema que opere de manera autónoma, siquiera de modo parcial.

Adam, nuestro robot, carece de forma humana. Es un laboratorio complejo y automatizado, con forma de cubículo y del tamaño de una pequeña oficina. El equipo comprende un congelador, tres robots de tratamiento de líquidos, tres brazos robóticos, tres incubadoras, un centrifugador y otros dispositivos, todos ellos automatizados. Adam cuenta también con un potente «cerebro»: un equipo informático que razona y controla los ordenadores personales que actúan sobre el equipo físico.

El diseño de Adam se orienta hacia un importante campo de la biología, muy adecuado para la automatización: la genómica funcional, que investiga las relaciones entre los genes y las funciones que estos llevan a cabo. Adam experimenta sobre el crecimiento de microorganismos. Para ello, selecciona cepas microbianas, los medios en que estas habrán de desarrollarse y, después, estudia su evolución durante varios días. El robot puede poner en marcha hasta 1000 combinaciones de cepas y medios cada día; todo ello por su propia cuenta.

El primer estudio completo versó sobre *Saccharomyces cerevisiae*, la levadura que se emplea en la fabricación de pan, cerveza, vino y whisky. El interés de esta levadura reside en que proporciona un buen modelo para entender el funcionamiento de las células humanas. *S. cerevisiae* posee muchos menos genes que nosotros y crece con rapidez. Y aunque los últimos antepasados comunes de humanos y levaduras se remontan a unos mil millones de años atrás, ambos tipos de células aún comparten numerosas características.

Adam ha intentado esclarecer el mecanismo mediante el que la levadura emplea enzimas (proteínas que catalizan reacciones bioquímicas) para convertir el medio de cultivo en más levadura y residuos. Después de más de 150 años de estudio, los detalles del proceso todavía no se conocen. Se han cuantificado las enzimas que produce la levadura, pero en algunos casos se desconocen los genes que las codifican. Adam trató de descubrir los genes «padre» de esas enzimas «huérfanas».

Como es natural, para poder realizar un descubrimiento, Adam necesita conocer la ciencia actual. Introdujimos en su programación abundantes conocimientos relativos al metabolismo y la genómica funcional de la levadura. La afirmación de que Adam posee «conocimientos» en lugar de «información» se presta al debate filosófico. En nuestra opinión, el uso del término se halla justificado, puesto que se refiere a lo que Adam emplea para razonar y dirigir sus interacciones con el mundo físico.

Ese conocimiento se representa en Adam mediante enunciados lógicos. La lógica nació hace 2400 años con el objetivo de describir el conocimiento con mayor precisión que el lenguaje natural. La lógica moderna constituye el medio más preciso para representar el saber científico e intercambiar conocimientos entre robots y seres humanos. Además, y dado que la lógica sirve como lenguaje de programación, los conocimientos de Adam pueden interpretarse como un programa informático.

Para iniciar la investigación, Adam fue programado con numerosos supuestos; por ejemplo, que el gen *ARO3* de *S. cerevisiae* codifica la enzima 3-desoxi-D-arabino-heptulosonato-7-fosfato, y que esta cataliza la reacción entre los compuestos fosfoenolpiruvato y D-eritrosa-4-fosfato para producir fosfato y 2-deshidro-3-desoxi-D-arabino-heptonato-7-fosfato.

En conjunto, todos esos hechos conforman un modelo de metabolismo de la levadura que integra conocimientos sobre genes, enzimas y metabolitos. La diferencia entre un modelo y una enciclopedia reside en que el primero puede convertirse en un programa informático capaz de formular predicciones a partir de datos. Un robot científico puede integrar modelos abstractos y equipos robóticos de laboratorio para comprobar y mejorar los modelos de modo automático.

RAZONAMIENTOS SOBRE GENES

El método científico contempla la formulación de hipótesis y su comprobación experimental. De igual modo, Adam comienza por postular un hecho relativo a la biología de la levadura, utiliza luego su modelo de metabolismo para deducir las consecuencias experimentales de su hipótesis y, por último, comprueba empíricamente dichas consecuencias para averiguar si los supuestos y las observaciones se muestran compatibles.

El ciclo se inicia cuando Adam formula sus hipótesis acerca de qué genes codifican las enzimas huérfanas. A fin de considerar las hipótesis más verosímiles, Adam emplea sus conocimientos previos. Por ejemplo, Adam sabía que una de las enzimas huérfanas era la 2-aminoadipato transaminasa, la cual cataliza la reacción entre el 2-oxoadipato y el L-glutamato para dar L-2-aminoadipato y 2-oxoglutarato (reacción que se produce también en sentido inverso). Para concebir una hipótesis sobre qué gen de la levadura codifica esta enzima, Adam primero buscó si existía algún gen en otro organismo que también la codificase. En efecto, entre los conocimientos de Adam figuraba que, en la rata parda (*Rattus norvegicus*), el gen *Aadat* codificaba la misma enzima.

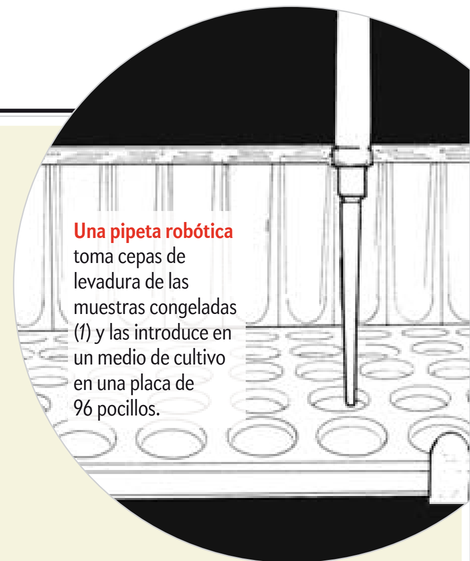
Adam tomó la secuencia proteica de la enzima codificada por *Aadat* y examinó si en el genoma de la levadura se codificaban secuencias similares. Adam sabe que, si dos secuencias se parecen lo suficiente, resulta razonable inferir que son homólogas; es decir, que comparten un ancestro común. Y también sabe que la función de ese ancestro común puede haberse conservado. En consecuencia, a partir de una semejanza entre secuencias, Adam deduce que sus respectivos genes quizá desempeñen la misma función. El robot halló tres genes de la levadura con secuencias similares a la de *Aadat*: *YER152c, YJL060w* e *YJL202w*. Después, formuló la hipótesis de que cada uno de ellos codificaba la enzima 2-aminoadipato transaminasa.

Adam realizó numerosos experimentos con el objetivo de verificar esas hipótesis. En su congelador disponía de una colección completa de cepas, a cada una de las cuales se le había extraído un gen específico. Adam seleccionó y cultivó aquellas que carecían de los genes *YER152c, YJL060w* e *YJL202w*, y estudió su crecimiento en presencia de los compuestos que intervienen en la reacción catalizada por la enzima, como el L-2-aminoadipato.

El paso siguiente consistía en experimentar con las cepas, por lo que Adam debía elegir qué pruebas llevar a cabo. La ciencia padece siempre restricciones financieras y, a menudo,

Biología robótica

Adam, un prototipo de robot científico, investiga las funciones de los genes de la levadura *S. cerevisiae*. Sus primeros resultados incluyeron la formulación de 20 hipótesis relativas a los genes que codifican determinadas enzimas. Después, realizó miles de experimentos para verificarlas.



Una pipeta robótica toma cepas de levadura de las muestras congeladas (*1*) y las introduce en un medio de cultivo en una placa de 96 pocillos.

1 Selección de las muestras
Un brazo robótico toma muestras de levadura congeladas y mezcla cepas y medios de cultivo (*inserto superior*).

2 Cultivo de la levadura
La incubadora calienta las muestras durante 24 horas. Cada 40 minutos, un brazo robótico inserta las placas en un lector óptico que monitoriza el crecimiento de la levadura (*inserto inferior*).

3 Separación de células
Se centrifuga cada placa para separar la levadura del medio.

Congelador

Incubadora

Lector óptico

Vertido de residuos

4 Eliminación del medio
Se hace fluir agua para arrastrar el medio y suspender las cepas en una solución salina.

5 Tratamiento de las cepas
Para contrastar las hipótesis, el brazo robot combina las cepas con diferentes medios de cultivo y con moléculas que afectan al metabolismo.

6 Seguimiento
La incubadora calienta cada placa durante varios días. A intervalos de 20 minutos, un brazo coloca las placas en un lector que envía a un ordenador los datos sobre el crecimiento de la cepa.

7 Análisis
El soporte lógico de Adam analiza los resultados. El proceso puede prolongarse durante varias horas.



Un haz luminoso en un lector óptico (*2* y *6*) ilumina los pocillos. La cantidad de luz que los atraviesa indica el nivel de crecimiento de la levadura.

DAVID JOHNSON

EXPERIMENTOS MENTALES

El razonamiento de un robot

Para «razonar», un robot emplea los mismos mecanismos que las personas. Uno de ellos es la *inferencia deductiva*, el fundamento de las matemáticas y la computación. El razonamiento deductivo es sólido: a partir de una verdad solo pueden deducirse nuevas verdades. Por desgracia, ante la falta de una «teoría final», la deducción no basta para que la ciencia progrese, ya que solo elabora consecuencias a partir de hechos conocidos.

Una segunda opción la proporciona el *razonamiento abductivo*. Aunque este ya no es sólido, como demuestra el ejemplo que reproducimos aquí (no todas las cosas blancas son cisnes), su utilidad reside en que permite formular hipótesis novedosas que pueden ser ciertas. El gran logro de la ciencia consiste en llegar a la verdad no a partir de la mera deducción, sino también mediante el experimento. Si Adam supone que Daisy es un cisne, determinar la verdad de dicha proposición requiere atrapar a Daisy y verificar si es un cisne, un pato u otra cosa.

Al igual que la abducción, la *inducción* ofrece una vía para elaborar hipótesis nuevas. Si todos los cisnes que vemos son blancos, resulta natural inferir, como ya hiciera Aristóteles, que todos los cisnes lo son. No obstante, la inducción no se encuentra libre de error: la inducción aristotélica se mostró falsa cuando se descubrieron cisnes negros en Australia. Las personas empleamos la inducción una y otra vez en la vida cotidiana. Es lo que nos asegura que mañana saldrá el sol y que nuestro desayuno no contiene veneno. No obstante, el papel de la inducción en la ciencia es controvertido. Su principal justificación se basa en que, por regla general, funciona; un razonamiento que constituye, en sí mismo, una inducción.



Al igual que los humanos, los robots emplean varios métodos de razonamiento. Sean o no sólidos, esos métodos permiten formular hipótesis y sugerir experimentos para corroborarlas.

DAVID JOHNSON

los científicos compiten por ser los primeros en resolver un problema. Por tanto, diseñamos a Adam para que concibiese experimentos eficientes que verificasen las hipótesis de manera económica y con prontitud. Para ello, Adam asigna a cada hipótesis una probabilidad de acierto. Este proceder despierta controversias, ya que algunos filósofos, como Karl Popper, han negado la posibilidad de asociar probabilidades a las hipótesis. No obstante, la mayoría de los científicos asumen de manera tácita que algunas hipótesis resultan más verosímiles que otras. Suele seguirse el principio de economía o de la «navaja de Ockham»: ante dos hipótesis por lo demás iguales, la más sencilla se tiene por la más probable. Adam también considera el coste de un experimento. Por el momento, este se limita al de los compuestos químicos utilizados, si bien un enfoque más completo habría de ponderar también el tiempo invertido.

Dado un conjunto de hipótesis, sus probabilidades, una serie de experimentos posibles y sus costes, programamos a Adam para que escogiese una secuencia de experimentos que minimizara el coste de eliminar todas las hipótesis salvo una. Semejante objetivo supone una tarea muy complicada en computación. No obstante, los experimentos seleccionados por Adam resolvieron los problemas con mayor velocidad y menores costes que los que ofrecían otras estrategias, como la simple elección de las pruebas más económicas. En ciertos casos, Adam puede diseñar un solo experimento que esclarezca un gran número de hipótesis a la vez. Los científicos se afanan por conseguir ese objetivo, ya que tienden a considerar una sola hipótesis en cada ocasión.

DE VEINTE HIPÓTESIS, DOCE NOVEDOSAS

Una vez que Adam dirige su atención hacia los experimentos más prometedores, utiliza su equipo robótico para realizarlos y observar los resultados. A Adam no le es dado observar genes o enzimas de manera directa, sino la cantidad de luz que atraviesa los cultivos de levadura. A partir de esos datos, y merced a un razonamiento complejo, Adam deduce si los indicios resultan compatibles con sus hipótesis. Tales cadenas argumentales son clásicas en la ciencia; los astrónomos, por ejemplo, infieren lo que sucede en galaxias remotas a partir de la radiación que llega a sus instrumentos.

Una de las tareas más complicadas para Adam fue decidir si una hipótesis era coherente o no. Ya se conocen todos los genes cuya supresión produce diferencias cualitativas en el crecimiento de las levaduras; eliminar otros solo causa ligeras alteraciones en el crecimiento. Para decidir si alguna de esas pequeñas diferencias ha de tenerse en cuenta, Adam aplicó sutiles técnicas de aprendizaje automático.

Nuestro robot generó y confirmó por vía experimental 20 hipótesis sobre los genes que codificaban algunas enzimas en la levadura; hipótesis que, como toda pretensión científica, necesitaban ser confirmadas. Para verificar las conclusiones de nuestro robot, recurrimos a fuentes de información de las que Adam no disponía y efectuamos nuestros propios experimentos. Encontramos que 7 de las 20 conclusiones de Adam ya se conocían, una era errónea y 12 resultaron novedosas.

A modo de comprobación, nuestros experimentos confirmaron que los tres genes (*YER152c, YJL060w* e *YJL202w*) codificaban la enzima 2-aminoadipato transaminasa. Parece probable que la razón de no haber descubierto antes su función residiese en que los tres codifican la misma enzima, la cual cataliza una serie de reacciones asociadas. Al contrario del caso

habitual, aquí no se daba la relación simple de una función enzimática por gen. Adam hubo de recurrir a minuciosos experimentos y análisis estadísticos para desentrañar estas dificultades.

¿ES EL ROBOT UN CIENTÍFICO?

No faltan objetores a la apelación «robot científico». Señalan, con cierto motivo, que Adam se parece más a un ayudante que a un científico independiente. ¿Es legítimo afirmar que Adam realiza descubrimientos de manera autónoma? Precisemos en primer lugar el alcance de su autonomía. No podemos, sin más, abandonar a Adam y volver semanas después para examinar sus conclusiones. Nuestro robot es un prototipo; sus soportes físico y lógico sufren fallos y requieren con frecuencia la atención de un técnico. La integración de los módulos lógicos de Adam también ha de mejorarse para que operen sin inconvenientes, de forma continuada y sin intervención humana. Pero el proceso de formular hipótesis y confirmar por vía experimental los nuevos conocimientos no depende de la atención humana, ni física ni intelectual.

La palabra «descubrir» suscita una discusión que se remonta al siglo XIX y a la figura romántica de Lady Ada Lovelace, hija de Lord Byron y colaboradora de Charles Babbage, el primero en concebir una máquina computadora de uso general. Lady Lovelace afirmaba: «La máquina analítica no pretende *originar* nada. Puede *hacer cualquier cosa que sepamos indicarle de qué manera* debe realizar» (cursivas de la autora). Cien años después, Alan M. Turing argumentaba en sentido contrario a partir de una analogía con niños: al igual que no cabe atribuir a un maestro todo el mérito de sus discípulos, los hombres tampoco deberían vanagloriarse de todos los logros de sus máquinas. Estos argumentos cobran cada vez mas importancia comercial; por ejemplo, según la ley de patentes de EE.UU., solo una «persona» puede «inventar» algo.

Por último, ¿qué hay de novedoso en la ciencia de Adam? Lo son algunas de las correspondencias entre genes y funciones enzimáticas de la *S. cerevisiae* que Adam ha postulado y confirmado por vía experimental. Representan un conocimiento modesto, pero en manera alguna trivial. En el caso de la enzima 2-aminoadipato transaminasa, Adam halló tres genes que quizá resuelvan un problema de medio siglo de antigüedad. Por supuesto, Adam puede llegar a conclusiones erróneas —cualquier conocimiento científico es provisional—, pero no parece verosímil que todas ellas lo sean. Sus resultados son de dominio público desde hace dos años y, en ese tiempo, nadie ha detectado errores. Que sepamos, ningún científico ajeno a nuestro grupo ha intentado todavía reproducirlos.

Otra manera de averiguar si Adam puede considerarse o no un científico pasa por generalizar los mecanismos de los que se sirve para enunciar hipótesis nuevas. Cuando Adam finalizó sus experimentos, iniciamos el desarrollo de Eva, un segundo robot. Eva aplica los mismos ciclos automatizados de investigación a la selección y diseño de fármacos, un importante objetivo clínico y comercial. Las lecciones de diseño que hemos aprendido de Adam han hecho de Eva un sistema mucho más elegante, que centra su investigación en la malaria, la esquistosomiasis, la enfermedad del sueño y el mal de Chagas. Su soporte lógico se encuentra todavía en desarrollo, pero ya ha encontrado compuestos prometedores frente a la malaria.

Otros investigadores han seguido una senda similar. Hod Lipson, de la Universidad de Cornell, utiliza la experimentación automatizada para perfeccionar el diseño de robots móviles y estudiar sistemas dinámicos. Otros intentan desarrollar robots científicos en áreas como la química, la biología o la ingeniería.

Varios grupos, entre ellos el nuestro, buscan la manera de automatizar la investigación en física cuántica, sobre todo en lo que atañe al control de procesos cuánticos. Herschel A. Rabitz, de la Universidad de Princeton, investiga con láseres de femtosegundos (10^{-15}) para crear o romper enlaces químicos. En tales casos, la dificultad radica en formular experimentos ingeniosos con suma rapidez.

COLABORACIÓN HUMANA

Si aceptamos la idea de que los robots ejercen de científicos, nos gustaría conocer sus límites. Al respecto, resulta instructivo comparar la automatización de la ciencia con la del ajedrez. Este último caso constituye un problema resuelto: los ordenadores juegan al ajedrez igual o mejor que los campeones del mundo y llevan a cabo movimientos de belleza exquisita. El dominio del ajedrez por parte de los ordenadores se debe a que el juego define un mundo abstracto y cerrado: 64 casillas y 32 piezas. Si bien la ciencia comparte en gran medida el carácter abstracto, la automatización se presenta más penosa porque los experimentos se realizan en el mundo físico. En cualquier caso, tenemos la esperanza de que desarrollar un robot con aptitudes científicas de calidad resulte más sencillo que diseñar sistemas de inteligencia artificial capacitados para la interacción social con humanos. En la ciencia, nos es lícito asumir que el mundo físico no intenta engañarnos, un paralelo que no podemos extender al ámbito social.

Los genios del ajedrez se sirven hoy de ordenadores para mejorar su juego, analizar posiciones y planear estrategias. Del mismo modo, cabe esperar que científicos humanos y robóticos cooperen para conseguir mejores resultados que los que cualquiera lograría por separado. Los progresos en los equipos de computación y en los sistemas de inteligencia artificial conducirán a robots cada vez más expertos.

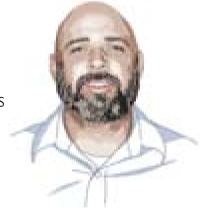
¿Llegarán algún día tales creaciones a modificar los paradigmas científicos o se limitarán a elaborar informes científicos rutinarios? Es esta una pregunta fundamental en lo que respecta al futuro de la ciencia. Algunos, como el nóbel de física Philip Anderson, opinan que la profundidad de tales cambios alcanza niveles tan profundos que su automatización se antoja imposible. Por su parte, el también laureado Frank Wilczek ha escrito que, de aquí a 100 años, el mejor físico será una máquina. El tiempo lo dirá.

Sea como fuere, en el futuro veremos la colaboración de científicos humanos y robóticos. El conocimiento se transcribirá en el lenguaje de la lógica y se difundirá instantáneamente a través de la Red. Y, poco a poco, los robots desempeñarán un papel cada vez más importante en el progreso científico.

PARA SABER MÁS

Computing machinery and intelligence. A. M. Turing en *Mind*, vol. LIX, n.º 236, págs. 433-460, octubre de 1950. **http://loebner.net/Prizef/TuringArticle.html**
How DENDRAL was conceived and born. Joshua Lederberg. ACM Symposium on the History of Medical Informatics, National Library of Medicine, 5 de noviembre de 1987. **http://profiles.nlm.nih.gov/BB/A/L/Y/P/_/bbalyp.pdf**
An introduction to the philosophy of science. Rudolf Carnap. Dirigido por Martin Gardner. Dover, 1995.
The chemistry of life. Cuarta edición. Steven Rose. Penguin, 1999.
The automation of science. Ross D. King et al. en *Science*, vol. 324, págs. 85-89, 3 de abril de 2009.

Craig McClain es director adjunto de ciencia en el Centro Nacional de Síntesis Evolutiva de Durham, Carolina del Norte. Centra sus investigaciones en los motores ecológicos y evolutivos de la biodiversidad de invertebrados marinos y del tamaño corporal, sobre todo en los sistemas del mar profundo.



BIOLOGÍA MARINA

Vida en los abismos

Los fondos marinos profundos constituyen un ecosistema complejo cuya suerte depende de la vida en las capas superficiales

Craig McClain

Casi el 64 por ciento de la superficie de nuestro planeta, alrededor de 208.640.000 kilómetros cuadrados, se sitúa debajo de los primeros 200 metros de mares y océanos. La ausencia de luz a esas profundidades impide la fotosíntesis, el sistema de obtención de energía que sustenta la mayoría de las redes tróficas. Nuestro mundo, con sus abundantes océanos, está dominado por hábitats desprovistos de alimento. Este hecho repercute en los fondos marinos, aunque de una manera distinta de la que se pensaba.

Hace dos siglos, se suponía que la ausencia de fotosíntesis, y por lo tanto de plantas, impedía la vida animal en el mar profundo. Los fondos más insondables se figuraban como un vasto desierto salpicado de pecios y esqueletos. Pero lo que en realidad alberga el fondo marino profundo, hoy conocido gracias a decenios de exploración y a los avances técnicos, es más complejo de lo que nadie había imaginado. A ello contribuyen los organismos que habitan no en el fondo, sino cerca de la superficie del mar.

Cada año se hunden en el océano unas 16 gigatoneladas de carbono, lo que representa solo el 3 por ciento de la cantidad total fijada por el fitoplancton en las capas superficiales. El carbono, transportado principalmente en forma de «nieve marina», espolvorea el fondo del mar y representa la única fuente de alimento para la mayoría de los organismos de las aguas profundas. En ese ambiente remoto con escasos recursos abundan los grandes enigmas. Existe en él una enorme biodiversidad, con adaptaciones evolutivas insólitas del tamaño corporal, así como otras novedades anatómicas. Una prueba más de la capacidad de adaptación de los seres vivos a los ambientes extremos.

¿HASTA DÓNDE HAY VIDA?

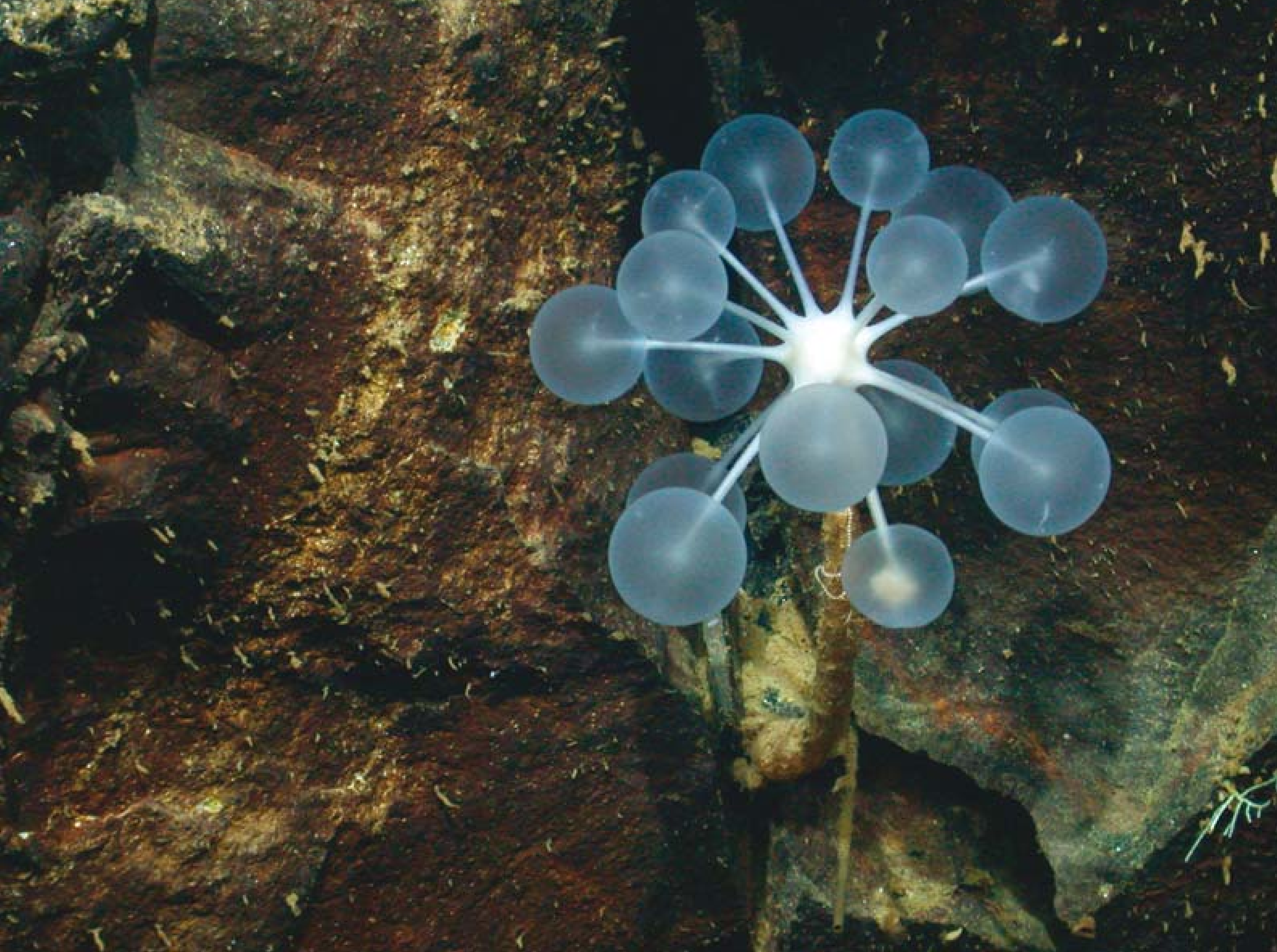
A mediados del siglo XIX, el naturalista Edward Forbes concluyó que la vida marina no podía existir más allá de los 550 metros de profundidad, lo que denominó hipótesis azoica. Con los conocimientos de que se disponía en la época, parecía lógico que ninguna especie pudiera sobrevivir en las condiciones extremas de alta presión, ausencia de luz y bajas temperaturas del océano más profundo. Las ideas de Forbes fueron aceptadas rápidamente por la comunidad científica. Aunque con el tiempo se demostró la falsedad de la hipótesis, se reconoció que contenía algunos elementos verdaderos. Forbes se dio cuenta de la

EN SÍNTESIS

Considerados antaño como una extensión yerma, los fondos marinos profundos albergan una diversidad de especies sorprendente. La vida en ese medio se sustenta con los escasos restos de los organismos que se hunden desde las capas superficiales.

La limitación de alimento ha determinado la evolución del tamaño corporal de las especies. A pesar de la miniaturización general del cuerpo, existe en las profundidades una divergencia de tamaños notable.

En distintas escalas de tiempo y espacio, la disponibilidad variable de alimento (dependiente en gran parte de la productividad biológica en superficie) ha determinado la biodiversidad y la evolución de las especies del fondo marino.



CORTESÍA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL ACUARIO DE LA BAHÍA DE MONTERREY/*AMERICAN SCIENTIST*

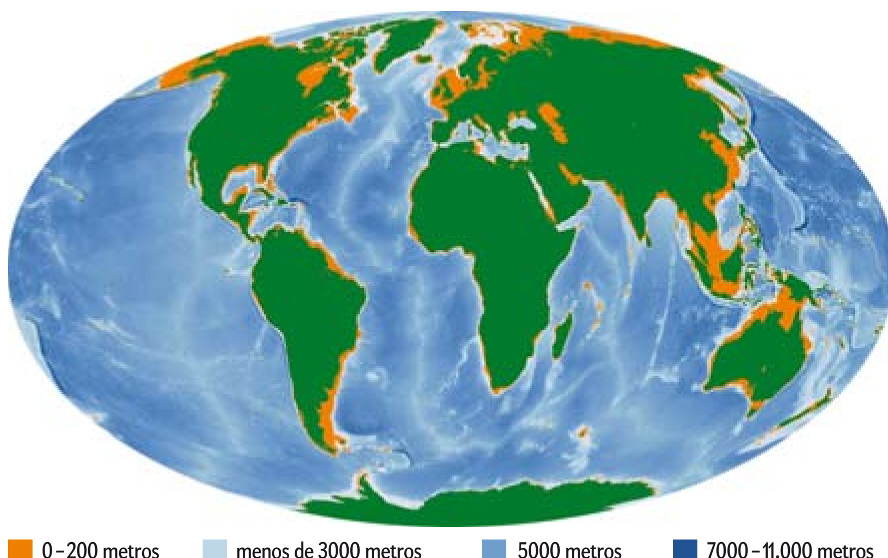
importancia del alimento para los organismos marinos; la falta de luz y la consiguiente ausencia de plantas en las profundidades le llevaron a creer que la vida no podía existir allí. No imaginó que la caída de materia desde arriba proporcionaría el carbono suficiente para sustentar a otros organismos.

En la superficie del océano, el fitoplancton convierte el dióxido de carbono en carbono orgánico mediante la fotosíntesis. El fitoplancton es consumido por otros organismos que, a su vez, sirven de alimento a otros, y así sucesivamente. Pasado el tiempo, todos los organismos perecen. Heces, organismos muertos y materia inorgánica se van incorporando continuamente al fondo marino profundo. Las bacterias y el fitoplancton producen como material de desecho polímeros que mantienen unidos estos agregados. Todos ellos forman en conjunto la nieve marina, el recurso alimentario principal del mar profundo.

La llegada de nieve marina al fondo del mar es heterogénea en el espacio y en el tiempo. En las regiones costeras, la producción fitoplanctónica se aprovecha del afloramiento de aguas ricas en nutrientes. De manera general, cuanto mayor es la producción biológica en superficie, mayor cantidad de nieve marina se aporta a las profundidades. Además, a medida que aumentan la distancia desde la costa y la profundidad, las partículas han de atravesar un mayor espesor de agua para alcanzar el fondo, lo que aumenta las probabilidades de que los organismos, desde bacterias hasta peces óseos, las consuman en parte o en su totalidad.

Lo que parece una escultura realizada con bolas de vidrio soplado corresponde en realidad a un animal de unos 30 centímetros de altura, la esponja del árbol de ping pong (*Chondrocladia lampadiglobus*). Muchas esponjas filtran partículas del agua para alimentarse, pero esta es carnívora y captura presas de su entorno mediante pequeños ganchos, una estrategia única que las especies del mar profundo han desarrollado para habérselas con la limitación de alimento.

Es justo señalar que Forbes no podía ser conocedor de la nieve marina, ya que esta se describió mucho después de su muerte. Tampoco era consciente de otros dos factores que constituyen el espinazo de la teoría moderna de los ecosistemas del mar profundo. En primer lugar, la biomasa (el peso del conjunto de seres vivos) del fondo se halla correlacionada con la cantidad de carbono que atraviesa las capas superficiales y la cantidad consiguiente de nieve marina. En 2007, nuestro equipo describió que los aumentos y disminuciones de biomasa a lo largo del fondo marino profundo del Atlántico Norte guardaban una estrecha relación con las variaciones de la producción planctónica en superficie. Como resultado, la mayor cantidad de biomasa se halla cerca de las regiones costeras y en las aguas más someras (no más allá de unos cientos de metros de profundidad). Por un golpe de mala suerte, Forbes había muestreado el mar Mediterráneo oriental profundo, en un área que hoy se sabe que presenta



Casi el 64 por ciento de la superficie de la Tierra se encuentra por debajo de los 200 metros de aguas superficiales. La ausencia de luz en estas profundidades impide la fotosíntesis y la proliferación de plantas, que por lo general sustentan las redes alimentarias terrestres o de las aguas superficiales.

una producción primaria superficial muy baja. En segundo lugar, las rastras de que se disponía entonces para muestrear el fondo resultaban ineficaces en la captura de organismos de tamaño reducido, lo que llevó a Forbes a pasar por alto la diversidad de la fauna abisal.

EVOLUCIÓN DEL TAMAÑO CORPORAL

La fauna del mar profundo se clasifica en cuatro componentes, según su tamaño: la megafauna, constituida por peces, cangrejos, langostas, estrellas de mar, erizos de mar, holoturias, esponjas y corales, organismos lo bastante grandes para ser fotografiados o capturados con dragas de arrastre; la macrofauna, formada por gusanos poliquetos, crustáceos y moluscos pequeños que pueden capturarse mediante un tamiz de malla fina pero apenas pueden identificarse a simple vista; la meiofauna, compuesta por foraminíferos, copépodos y nemátodos que solo son retenidos por un tamiz de malla muy fina; y, finalmente, las bacterias, los organismos más diminutos.

En 1975, el importante trabajo de Thiel, de la Universidad de Hamburgo, demostró que a mayor profundidad, menor era el tamaño de los organismos, hecho relacionado con la restricción de alimentos. En concreto, halló una disminución más rápida de la megafauna y la macrofauna que de la meiofauna o las bacterias. En realidad, al aumentar la profundidad, la meiofauna y las bacterias se hacían cada vez más dominantes. En un ejemplo sorprendente, junto con mi director de tesis doctoral, Michael Rex, de la Universidad de Massachusetts en Boston, calculamos que toda nuestra colección de gasterópodos del mar profundo del Atlántico Norte occidental (más de 20.000 conchas), cabría dentro de una única concha de *Busycon carica*, un buccino de Nueva Inglaterra del tamaño de un puño.

Pero al afirmar que todos los animales de las profundidades están miniaturizados se pasa por alto la complejidad de la evolución del tamaño en ese hábitat único. Uno de los enigmas con que me enfrenté al principio de mi investigación era que, a pesar de la miniaturización general de los invertebrados del mar profundo, algunos taxones alcanzaban tamaños mayores, próximos al gigantismo. Así, aunque los caracoles del mar profundo son más pequeños que sus parientes de aguas superficiales, aumentan de tamaño con la profundidad y la supuesta menor disponibilidad de alimento. Para confundir aún más la situación, otros científicos han informado de la pauta opuesta en otros tipos de caracoles y crustáceos, cuyas dimensiones se reducen con la profundidad. Se planteaba la siguiente cuestión: ¿Qué procesos biológicos produjeron esas tendencias opuestas en la evolución del tamaño corporal?

Para contestar a esa pregunta dirigí mi atención hacia otro hábitat con recursos limitados, las islas, donde los extremos de tamaño corporal están bien documentados. El pequeño kiwi y el enorme moa de Nueva Zelanda, el colosal dragón de Komodo en la isla del mismo nombre, los extinguidos elefantes pigmeos de las islas del Mediterráneo, la rana del tamaño de una hormiga de las Seychelles, la cucaracha silbadora gigante de Madagascar y la tortuga gigante de las Galápagos representan solo algunas de tantas anomalías insulares por lo que al tamaño se refiere. En 1964, J. Bristol Foster, de la Universidad de África Oriental, demostró que en las islas los mamíferos grandes acaban miniaturizándose con el tiempo, mientras que los pequeños tienden al gigantismo. Ese fenómeno frecuente se conoce como «regla de Foster» o «regla insular». El escaso número de depredadores, la menor competencia de otras especies, la reducción del hábitat y la restricción de alimentos contribuirían a esas trayectorias evolutivas nuevas y a veces extrañas en las islas.

El hecho de que islas y mar profundo tengan tan poco en común sugiere que la tendencia evolutiva similar del tamaño corporal se debe a un único rasgo que ambos hábitats comparten: la escasez de alimentos. Por un lado, el carbono resulta insuficiente para sostener únicamente poblaciones de gigantes. Por otro, los organismos más pequeños, sin poder desplazarse a largas distancias en

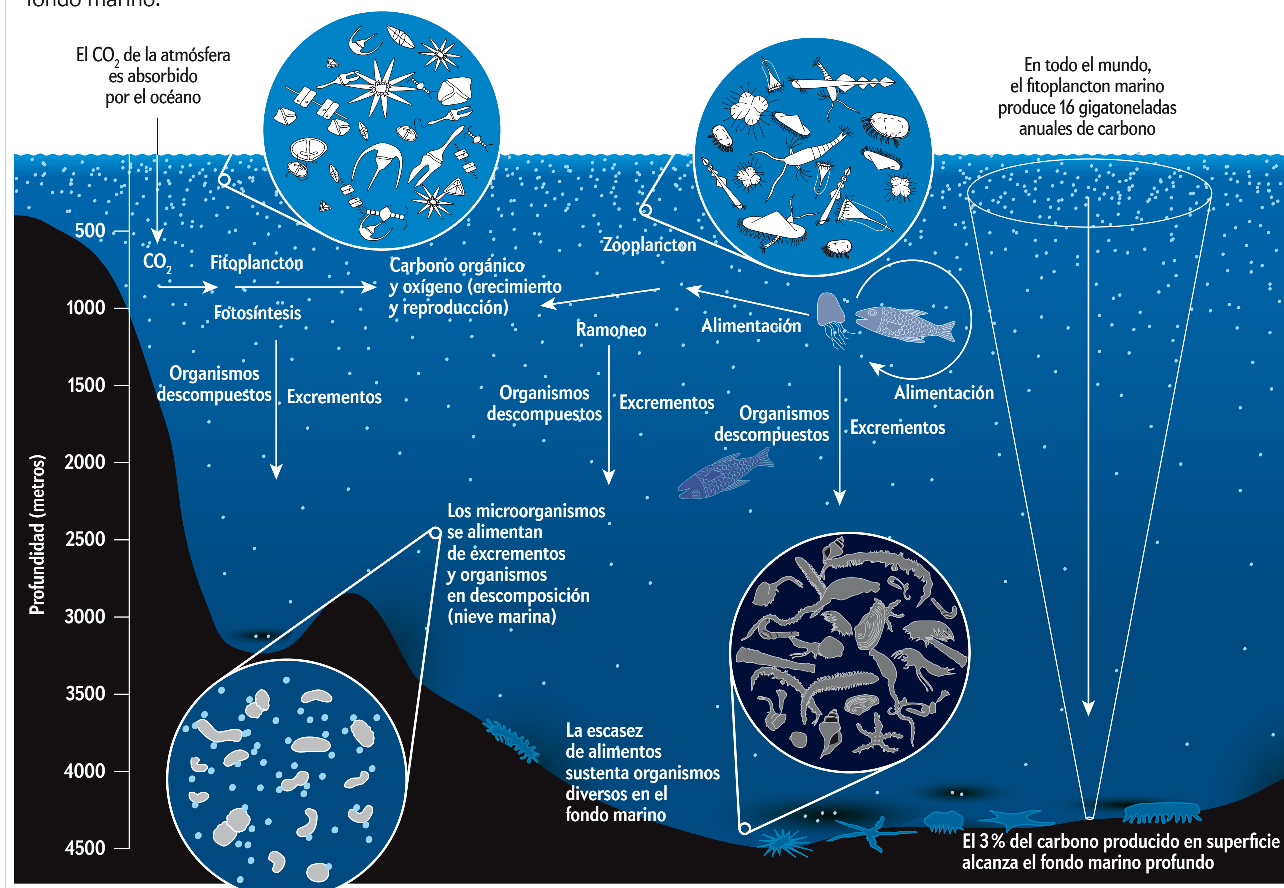


El naturalista Edward Forbes llegó a la conclusión, en la década de los cuarenta del siglo XIX, de la ausencia de vida en el mar más allá de los 550 metros de profundidad. Introdujo la idea, ampliamente aceptada entonces, de una zona «azoica», sin vida, en esas aguas profundas.

CORTESÍA DE LA CARTA BATIMÉTRICA GENERAL DE LOS OCÉANOS *(mapa)*; BIBLIOTECA LINDA HALL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA *(Forbes)*/AMERICAN SCIENTIST

El sustento de los fondos abisales

Los seres vivos cerca de la superficie marina representan un suministro esencial de alimento para los fondos. A medida que el fitoplancton, el zooplancton y otros organismos más grandes liberan desechos o mueren en la superficie del mar, los restos se hunden lentamente y forman la nieve marina. Durante su descenso, las partículas ricas en carbono se agregan en «copos» que se mantienen unidos por mucus y otras sustancias producidas en parte por bacterias, que a su vez se alimentan de dichas partículas. Gran parte de la nieve marina se consume por el camino: solo el tres por ciento del carbono producido cerca de la superficie alcanzará el fondo marino.



busca de comida o de almacenar grandes reservas de grasa en períodos de escasez alimentaria, se encuentran asimismo en desventaja. Si esas presiones de selección contrarias actuaran por igual, predominaría el tamaño intermedio. Sin embargo, la selección natural desfavorece más a los organismos más grandes, lo que conduce a una convergencia evolutiva hacia un tamaño algo inferior al intermedio. He observado esta pauta en taxones totalmente alejados, como moluscos bivalvos y tiburones. La distinta respuesta de los organismos frente a la limitación de alimento puede resolver la notable paradoja de la divergencia de tamaños en las profundidades marinas.

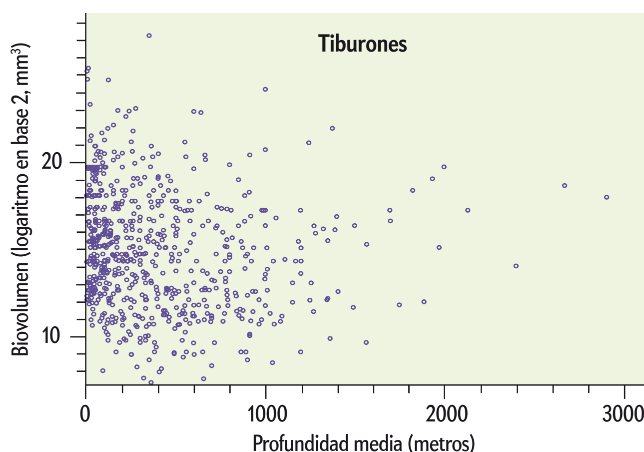
ADAPTARSE A LOS EXTREMOS

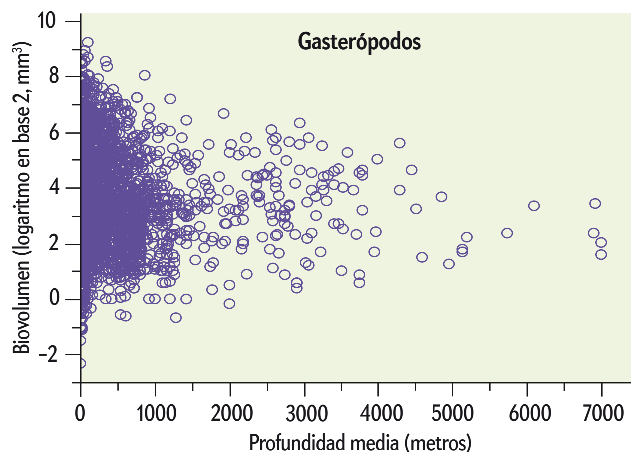
En el mar profundo los organismos presentan soluciones creativas al tener que habérselas con una menor disponibilidad de alimento. Uno de los mejores ejemplos de resistencia a la tendencia general de miniaturización es el isópodo gigante *Bathynomus giganteus*, de 36 centímetros de longitud, pariente de las cochinillas de humedad comunes. Es el mayor representante del orden Isópodos y uno de los mayores crustáceos conocidos. Además de permitirle monopolizar de manera rápida y eficiente el alimento en los abismos marinos, el gigantismo también confiere al isópodo un área de búsqueda de recursos más extensa, ya sea en el mar o en tierra. Puede sobrevivir así durante ocho semanas sin comer.

En un acuario, el gasterópodo *Neptunea amianta*, un caracol del tamaño de una pelota de tenis, sobrevive hasta tres meses sin alimentarse. Ese potencial de ayuno refleja la mayor capacidad de los organismos grandes de mantener reservas lipídicas. *N. amianta* presenta asimismo una adaptación intrigante ante la restricción alimentaria: las hembras ponen vainas de 30 centímetros de altura que contienen miles de huevos. Las primeras crías que surgen al hacer estos eclosión se arrastran por la vaina de huevos y devoran a sus hermanos no nacidos. Aunque ello pueda parecer malévolo, asegurar la supervivencia de unas cuantas crías con comida fácilmente disponible resulta esencial en las profundidades.

Las hembras de los peces de la familia Ceratíidos aseguran su sustento con la ayuda de un órgano que da nombre a su grupo: pescadores de caña. Derivado evolutivamente de las espinas de la aleta dorsal, un cebo azul iluminado pende de un pedúnculo sobre la cabeza. Bacterias simbiontes en el extremo del

AMERICAN SCIENTIST

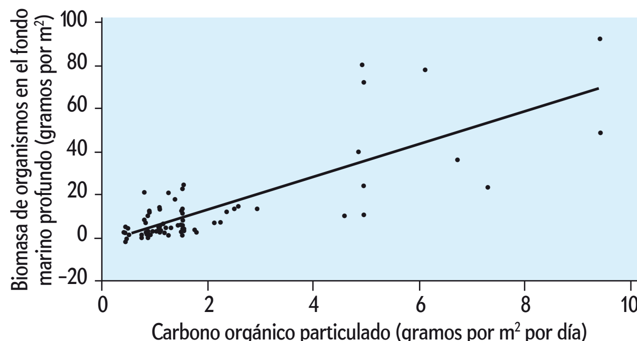




El carbono total disponible a grandes profundidades no puede sustentar un gran número de organismos gigantes o minúsculos. Mientras los primeros no pueden sobrevivir sin un suministro alimentario importante, los segundos, incapaces de desplazarse a distancias largas en busca de comida o de mantener reservas suficientes de grasa durante los períodos de ayuno, se hallan asimismo en desventaja. A medida que la profundidad aumenta y el alimento escasea, los organismos de gran tamaño y los de tamaño reducido van desapareciendo, aunque los primeros lo hacen antes que los segundos. Esta tendencia produce el patrón triangular de las figuras de arriba.

cebo producen luz que atrae a las presas hacia la boca. Las medusas del género de sifonóforos *Erenna* utilizan también luz para captar la atención de las presas. La luz roja, una rareza entre los organismos luminiscentes, se emite cuando la medusa agita sus tentáculos de forma peculiar, lo que hace que se confundan con copépodos, un recurso alimentario de numerosos peces pequeños.

La bioluminiscencia ayuda asimismo a compensar la escasez de alimento en otra área importante de la vida: el sexo. Un censo demográfico reducido como consecuencia de unos recursos escasos plantea un reto formidable para aquellos animales que buscan pareja. Para muchos peces, la bioluminiscencia sirve como señuelo. En los peces pescadores de caña, la dificultad en hallar pareja se ha resuelto mediante otra innovación evolutiva: los machos, de tamaño inferior al de las hembras, buscan pareja mediante un sistema olfativo intensificado. Cuando macho y hembra entran en contacto, se liberan enzimas que unen la boca del macho con el cuerpo de la hembra, tras lo cual todos los órganos del macho, con excepción de las gónadas, se atrofian. El macho parásito se transforma así en una fuente continua de espermatozoides.



La biomasa, la cantidad de seres vivos en el fondo del mar profundo, equivale a la cantidad de carbono orgánico particulado que se hunde desde la superficie oceánica hasta el fondo del mar.

DIVERSIDAD BIOLÓGICA EN LOS FONDOS

La rica variedad de adaptaciones frente a la limitación de alimentos en el mar profundo se traduce en una biodiversidad que habría sorprendido a Edward Forbes. En 1968, Howard Sanders demostró en un estudio comparado que, en la zona templada, esa diversidad superaba a la de la costa y se acercaba a la de las aguas someras tropicales. Investigaciones más recientes indican que la riqueza faunística en las profundidades puede parangonarse incluso con la de las pluviselvas tropicales. En una superficie reducida, coexisten en el mar profundo un número singularmente elevado de especies: un área equivalente a la de una mesita auxiliar puede contener más de 300 especies.

Sin embargo, la biodiversidad en los abismos marinos resulta contradictoria. En hábitats como los arrecifes coralinos y las pluviselvas tropicales, la variedad de ambientes y recursos disponibles sostiene múltiples nichos ecológicos y una comunidad rica en especies. En contraste, el fondo marino, llano y fangoso, carente de estructuras que proporcionen complejidad, representa un medio homogéneo donde todos los organismos dependen de los escasos recursos alimentarios procedentes de la superficie, por los que compiten.

Pero el fondo marino profundo no es tan homogéneo como parece a primera vista. Fred Grassle y Howard Sanders, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, propusieron en 1973 que este medio presentaba un mosaico de microhábitats de unos pocos centímetros de extensión. Según su hipótesis, cada microhábitat proporciona una combinación única de características ambientales que sostiene un conjunto singular de especies de macrofauna. Desde entonces, se han esclarecido algunos detalles de dichos microambientes, así como las razones de su abundancia en el mar profundo. Su existencia responde en parte a las galerías, tubos y montículos construidos por los organismos de mayor tamaño, como los erizos de mar, estrellas de mar, holoturias, gusanos y cangrejos, así como a los desplazamientos de esos animales por el sedimento.

El mosaico diverso de hábitats responde asimismo a la acumulación heterogénea de la nieve marina en el fondo del mar. Es probable que la microtopografía del fondo capte más partí-









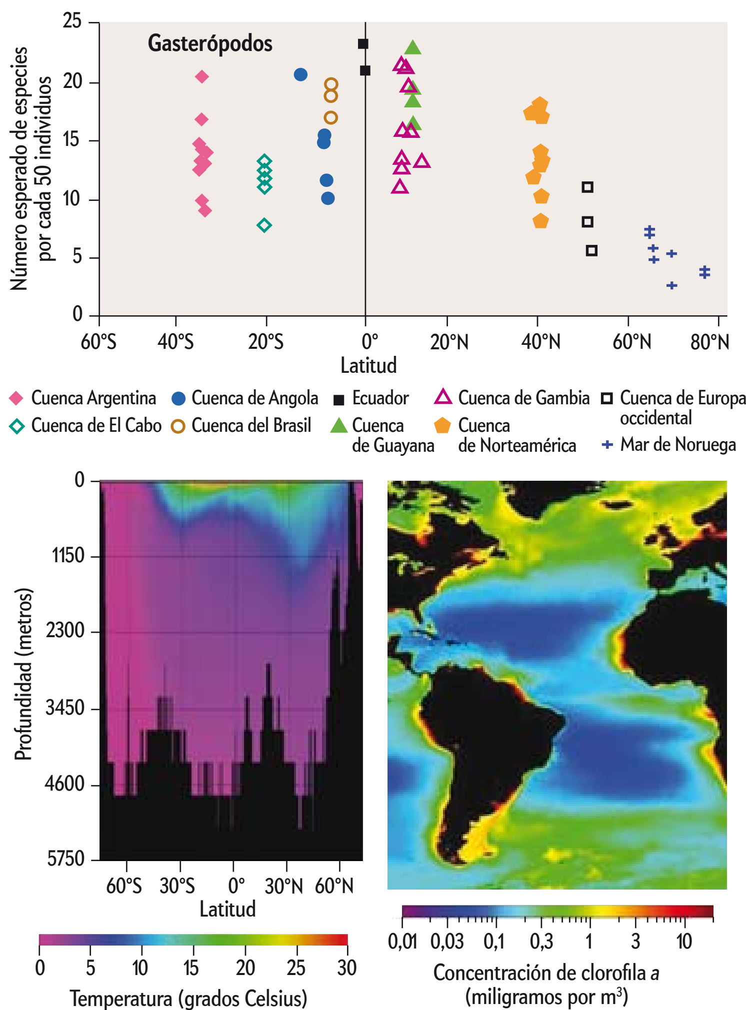
FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DE ROBERT S. CARNEY, DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE LOUISIANA (*isópodo*), INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL ACUARIO DE LA BAHÍA DE MONTERREY (*sifonóforo y gasterópodo*) Y JUSTIN MARSHALL, DEL INSTITUTO DEL CEREBRO DE QUEENSLAND (*pescador de caña*)/*AMERICAN SCIENTIST*

Para prosperar en el mar profundo, algunos animales han desarrollado características muy novedosas. El isópodo gigante *Bathynomus giganteus* (*arriba, izquierda*) se desplaza deprisa hacia recursos alimentarios efímeros y almacena grasa durante las épocas de escasez. La medusa del género *Erenna* (*arriba, derecha*) exhibe una luminiscencia roja inusual que hace que sus tentáculos se parezcan a copépodos, el sustento de numerosos peces pequeños. Las hembras de la familia Ceratíidos (*abajo, izquierda*) atraen a sus presas con señuelos, iluminados por bacterias simbióticas. Y la hembra del gasterópodo *Neptunea amianta* (*abajo, derecha*) pone miles de huevos en vainas ovígeras que constituyen un recurso alimentario para los primeros que hacen eclosión.

culas en las depresiones, como sucede con la distribución de la nieve en una superficie irregular de césped. Además, el carbono procedente de las capas superiores puede agregarse antes de llegar al fondo. Los larváceos o apendicularias, un grupo de animales del plancton, segregan a su alrededor un habitáculo de mucus que filtra las partículas del agua. Esas construcciones se obturan fácilmente y los larváceos las mudan cada cuatro horas aproximadamente. Cuando sus restos llegan al fondo del mar representan un recurso alimentario muy rico en carbono. La variedad de microhábitats se conserva durante largo tiempo en el mar profundo, apenas afectado por las corrientes constantes y rápidas que homogeneízan el fondo marino de las aguas someras.

La disponibilidad desigual de alimento contribuye también a la biodiversidad a una mayor escala. En 1973, Michael Rex describió el complejo patrón de la biodiversidad en función de la profundidad. A medida que esta última aumenta y la entrada de carbono disminuye, la diversidad del fondo marino aumenta. Pero a profundidades intermedias, de unos 2 a 3 kilómetros, el patrón se invierte y la diversidad empieza a reducirse rápidamente. Esta relación entre productividad y diversidad, con una diversidad máxima a niveles intermedios de productividad, se repite en otros ambientes y organismos. Desde entonces se ha intentado interpretar este patrón en numerosos artículos. El efecto Allee representa la explicación más probable de la reducción de la diversidad ligada al descenso de la productividad: la escasez de recursos sostiene un número cada vez menor de individuos de las diferentes especies, con lo que las especies tienden a extinguirse localmente debido a perturbaciones ambientales aleatorias; como consecuencia, la diversidad total de un área determinada disminuye.

El hecho de que una mayor disponibilidad de alimentos se traduzca en una menor riqueza de especies parece, pues, contradictorio. A principios de 2010, junto con Jim Barry, del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (MBARI), publicamos un estudio que ofrecía una solución a esa



Al igual que los organismos terrestres, los organismos del mar profundo presentan una elevada diversidad en los trópicos, que va disminuyendo hacia los polos. Michael A. Rex, de la Universidad de Massachusetts en Boston, describió esa tendencia (*gráfico superior*) en los gasterópodos (y otros organismos). Algunos investigadores han aducido que la reducción de la temperatura podría dar lugar a este fenómeno mundial. Pero en el mar profundo la temperatura varía poco con la latitud (*abajo, izquierda*). En cambio, la producción de alimento en la superficie, diferente según la latitud (*abajo, derecha*), sí podría explicar tal tendencia.

DANIELLE K. STOLL, DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE EE.UU. (*mapa de temperaturas oceánicas*) Y NASA (*mapa de producción del fitoplancton, datos promediados de 2002 a 2010*)/*AMERICAN SCIENTIST*

incógnita. En los cañones submarinos, el alimento se acumula en la base de las paredes escarpadas. Las especies muy móviles de la megafauna, como erizos de mar, holoturias, cangrejos y estrellas de mar, se concentran con rapidez en esas zonas y monopolizan los recursos alimentarios. La intensa actividad de la megafauna revuelve el sedimento de manera drástica. Esa perturbación y el déficit de alimentos crean condiciones severas para la macrofauna, como los organismos que construyen tubos de sedimento, cuyas estructuras quedan destruidas. Muy pocas de esas especies logran sobrevivir. Así, en los fondos situados a una menor profundidad y con una mayor disponibilidad de carbono, la megafauna predominará y, en último término, limitará la biodiversidad de la macrofauna.

GRADIENTE LATITUDINAL

Las observaciones en los fondos marinos pueden ayudar a esclarecer el funcionamiento de otros hábitats. La biodiversidad es elevada en los trópicos y se reduce hacia los polos. Este gradiente latitudinal de la diversidad específica (GLDE) se registra en una variedad de ecosistemas marinos, terrestres y de aguas continentales. Se han propuesto numerosas teorías para explicar ese patrón, que apuntan a factores como la inestabilidad climática, la rigurosidad del clima, la temperatura, las tasas de especiación, las tasas de extinción, el parasitismo, la depredación, la competencia y la disponibilidad de alimentos. En 1993, Michael Rex describió el GLDE en el mar profundo: en los moluscos y crustáceos del océano Atlántico, verificó un aumento de la diversidad cerca del ecuador y una reducción de la misma cerca de los polos. Trabajos posteriores revelaron que los foraminíferos seguían esa misma pauta. Probablemente esa tendencia no guarda relación con la temperatura, ya que esta varía muy poco en el mar profundo, unos 4 grados Celsius, y se mantiene uniforme a lo largo de grandes extensiones. Pero existe otro parámetro que sí cambia con la latitud: la producción planctónica en la superficie marina.

La dinámica temporal en la disponibilidad de alimento ha influido en la biodiversidad del mar profundo en distintas escalas de tiempo, lo que ha dado lugar a una variabilidad entre períodos geológicos y entre años. El grupo de Moriaki Yasuhara, de la Institución Smithsoniana, ha utilizado testigos de sedimento del Programa de Perforación Oceánica para desentrañar la historia de unos crustáceos diminutos, los ostrácodos, a lo largo de los últimos 500.000 años en el mar profundo tropical. En ese tiempo se produjeron cuatro ciclos climáticos glaciales-interglaciales que alteraron profundamente la temperatura, las corrientes y la producción planctónica de los océanos. Durante los períodos glaciales, la diversidad de los ostrácodos en el océano tropical profundo se desplomó como consecuencia de la menor producción superficial, con lo que el GLDE desapareció, mientras que en los períodos interglaciales, el fenómeno se invirtió y el grupo experimentó una enorme diversificación.

A una escala de tiempo inferior (del orden de decenios), los ciclos de El Niño y La Niña, que modifican las temperaturas superficiales del océano Pacífico tropical, pueden cambiar asimismo los patrones de la producción superficial. La Estación M (localidad situada a 4000 metros de profundidad en aguas de Santa Bárbara, California) ha sido estudiada de manera continuada durante casi dos décadas, algo inhabitual en la investigación del mar profundo. El trabajo realizado en la Estación M por Henry Ruhl y Ken Smith, de la Institución de Oceanografía Scripps y del MBARI, demuestra que, durante las oscilaciones de temperatura superficial del océano Pacífico asociadas a los fenómenos de El Niño y La Niña, la cantidad de fitoplancton varía en concordancia. Y la diversidad y abundancia de la megafauna y la macrofauna también cambian. Estos estudios excepcionales revelan un notable patrón temporal en la diversidad del mar profundo que refuerza la relación entre la producción superficial y los abismos marinos.

ATISBOS DEL PASADO

La manera en que el mar profundo actual responde a gradientes de alimento a lo largo del fondo marino permite también realizar conjeturas sobre la evolución histórica de la fauna marina. Hace entre 200 y 100 millones de años tuvo lugar la revolución marina del Mesozoico (RMM), una de las reorganizaciones más espectaculares de la vida en la Tierra. En 1995, Richard Bambach, del Instituto Politécnico y la Universidad estatal de Virginia, apuntó que en ese período creció la demanda alimentaria de los animales marinos. Lo dedujo a partir de indicios del aumento de la depredación, movilidad, excavación de madrigueras, morfologías antidepredación, carnosidad, bioincrustación, bioerosión y tamaño corporal. Es decir, el aumento de productividad de los océanos proporcionó la energía necesaria para impulsar la innovación durante la RMM.



Un testigo de sedimento de unos 7 centímetros de diámetro y 10 centímetros de espesor extraído del fondo marino profundo puede contener una gran diversidad de macrofauna, como ilustra la imagen. Una superficie del tamaño de una mesita auxiliar puede contener más de 300 especies. Dicha diversidad rivaliza con la de los arrecifes coralinos y pluviselvas tropicales.

En un artículo reciente publicado junto con Seth Finnegan, de la Universidad de Stanford y el Instituto de Tecnología de California, y otros, intentamos explicar la RMM desde otro ángulo. Exploramos la evolución de la demanda de alimentos en uno de los grupos predominantes en el registro fósil: los gasterópodos. Mediante datos del registro fósil marino, información de los océanos modernos (someros y profundos), datos fisiológicos de especies vivas y ecuaciones matemáticas, estimamos el consumo energético necesario para sostener la vida. Calculados con ecuaciones que se formularon hace un siglo, la temperatura y el tamaño corporal de un animal pueden informarnos acerca de sus necesidades energéticas básicas, o metabolismo. Los organismos de mayor tamaño y de sangre caliente emplean una mayor cantidad de energía. La necesidad metabólica de una comunidad de organismos se calcula a partir de la necesidad individual multiplicada por el número de individuos de esa comunidad.

Extrapolamos la demanda energética de las comunidades de gasterópodos en el pasado remoto a partir de nuestro conocimiento de los caracoles modernos. Al comparar los gasterópodos anteriores y posteriores a la RMM, dedujimos que las tasas metabólicas per cápita habrían aumentado un 150 por ciento, cambio que en gran parte se debió al aumento del tamaño corporal. Si tenemos en cuenta la mayor presencia de carnívoros, organismos más caros desde el punto de vista metabólico, el porcentaje de aumento de la tasa metabólica después de la RMM debió de ser notablemente superior. Al demostrar que un cambio similar en la demanda metabólica tiene lugar desde las profundidades con escaso alimento hasta las aguas costeras productivas, proporcionamos pruebas de que la productividad oceánica hace entre 200 y 100 millones de años debió aumentar para sostener tal transformación.

UN FUTURO INCIERTO

En la actualidad nuestro planeta inicia otro período crucial de fluctuación. Con la emisión de gases de efecto invernadero, el clima mundial se va modificando y cada vez hay más indicios de la alteración de la producción y del ciclo del carbono en los océanos. Investigaciones recientes demuestran que algunas zonas de los océanos han sufrido una reducción del 50 por ciento en la producción fitoplanctónica, mientras que otras han experimentado un aumento del 50 por ciento. El grupo de Daniel Boyce, de la Universidad Dalhousie, informó en tiempo reciente que, a lo largo del último siglo, la producción fitoplanctónica mundial había disminuido. Esta redistribución y reducción del carbono en la superficie oceánica podría afectar el mar profundo de manera importante en los próximos decenios. Pero los cambios en el ciclo del carbono representan tan solo una de las numerosas amenazas a las que se enfrentan los océanos. Cabe destacar el efecto pernicioso conjunto de la sobrepesca, la contaminación, la explotación minera, el aumento de la temperatura y la acidificación.

Los organismos abisales viven en extremos ambientales de temperatura, presión y disponibilidad de alimento. En los distintos niveles de organización biológica, desde los individuos al ecosistema, han tenido lugar transformaciones ecológicas y evolutivas extraordinarias en paralelo con aquellos límites. ¿Hasta qué punto soportarán las especies del mar profundo la alteración progresiva de ese medio provocada por la actividad humana?

PARA SABER MÁS

Shifts in deep-sea community structure linked to climate and food supply. H. A. Ruhl y K. L. Smith en *Science*, vol. 305, págs. 513-515, 2004.

The island rule and the evolution of body size in the deep sea. C. R. McClain, A. Boyer y G. Rosenberg en *Journal of Biogeography*, vol. 33, págs. 1578-1584, 2006.

Climatic influences on deep-sea ostracode (Crustacea) diversity for the last three million years. M. Yasuhara y T. M. Cronin en *Ecology*, vol. 89, págs. S53-S65, 2008.

Global phytoplankton decline over the past century. D. G. Boyce, M. R. Lewis y B. Worm en *Nature*, vol. 466, págs. 591-596, 2010.

Habitat heterogeneity, biogenic disturbance, and resource availability work in concert to regulate biodiversity in deep submarine canyons. C. R. McClain y J. Barry en *Ecology*, vol. 91, págs. 964-976, 2010.

Deep-Sea News. Blog dirigido por el autor, que recoge la actualidad sobre la investigación marina en **http://deepseanews.com**

Brianna Rego realiza su doctorado en historia de la ciencia en la Universidad de Stanford. Como parte de su tesis, en 2009 publicó un artículo sobre las investigaciones que la industria tabaquera ha venido realizando acerca del polonio en el tabaco. El Centro Nacional para Niños sin Tabaco distribuyó ese artículo entre los miembros del Congreso de EE.UU. para facilitar la aprobación de una normativa reciente.



TABAQUISMO

Humo radiactivo

La industria tabaquera lleva décadas sin hacer nada para eliminar un isótopo peligroso de los cigarrillos

Brianna Rego

En noviembre de 2006, Alexander Litvinenko, antiguo agente de la KGB, moría en un hospital de Londres bajo circunstancias que recordaban a los asesinatos de la guerra fría. El veneno que acabó con su vida, un isótopo radiactivo llamado polonio 210, se encuentra mucho más extendido de lo que creemos: la población mundial fuma unos seis billones de cigarrillos al año, y cada uno de ellos contiene una pequeña cantidad de polonio 210 que acaba en los pulmones. Para un fumador de paquete y medio al día, la cantidad de veneno inhalada a lo largo de un año supone una radiación equivalente a la de 300 radiografías de tórax.

Aunque el polonio no constituya el principal carcinógeno del humo del tabaco, solo en EE.UU. provoca miles de muertes al año. Pero, a diferencia de lo que ocurre con otras sustancias nocivas, las muertes provocadas por polonio podrían evitarse con facilidad. La industria tabaquera conoce la presencia del polonio en los cigarrillos desde hace casi cincuenta años. Existen documentos internos que demuestran que los fabricantes idearon métodos para rebajar de manera drástica la concentración del isótopo en el humo del tabaco, pero decidieron no hacer nada y mantuvieron en secreto sus investigaciones.

Sin embargo, puede que en EE.UU. la situación cambie dentro de poco. En junio de 2009 el Gobierno estadounidense aprobó la Ley para el Control del Tabaco y la Prevención del Tabaquismo en la Familia. Por vez primera, el tabaco queda bajo la jurisdicción de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA), lo que faculta al organismo para regular algunos de los componentes de los cigarrillos. Obligar a la industria a eliminar el polonio del tabaco constituiría uno de los pasos más sencillos en la lucha contra la muerte por tabaquismo.

PUNTOS CALIENTES

El primer indicio de que el polonio 210 acababa en los pulmones de los fumadores se obtuvo casi por casualidad. Durante la primera mitad de los años sesenta, los efectos de la radiactividad sobre la salud despertaron gran interés entre los expertos, así como en gran parte de la población. Por entonces, la experta en radioquímica Vilma R. Hunt y sus colaboradores de la Escuela de Salud Pública de Harvard desarrollaron una técnica para medir niveles muy bajos de radio y polonio, los elementos que Pierre y Marie Curie habían descubierto en 1898. Como recuerda Hunt, un día de 1964 se fijó en la ceniza del cigarrillo de uno de sus compañeros de laboratorio y decidió analizarla.



Tras ver los resultados, se asombró al no encontrar ningún indicio de polonio. Las trazas de isótopos radiactivos en el entorno son habituales y contribuyen a la radiación natural de fondo. Y ningún otro material orgánico investigado por Hunt, incluidas las plantas, había arrojado un resultado negativo para el polonio si el radio estaba presente. Sin embargo, a la temperatura de combustión del tabaco, el polonio se volatiliza. Hunt dedujo que el polonio ausente de las cenizas debía pasar al humo y, en consecuencia, a los pulmones del fumador.

EN SÍNTESIS

La planta del tabaco acumula pequeñas concentraciones de polonio 210, un isótopo radiactivo que proviene, sobre todo, de la radiactividad natural de los abonos.

El polonio que inhalan los fumadores se instala en puntos específicos de los pulmones; se calcula que provoca en torno a un dos por ciento de los cánceres de pulmón debidos al tabaco.

La industria tabaquera conoce desde hace décadas los peligros derivados del polonio y ha investigado la manera de eliminarlo de los cigarrillos, pero jamás ha tomado medidas al respecto.

A diferencia de otros carcinógenos del tabaco, el polonio podría eliminarse con procedimientos tan simples como lavar las hojas de la planta o emplear filtros apropiados, entre otros.

Hunt y Edward P. Radford, también de Harvard, publicaron en *Science* su trabajo, el cual incluía mediciones directas de las cantidades de polonio en el humo. Poco después, otros investigadores de Harvard comenzaron a estudiar las concentraciones del isótopo en los cigarrillos y en los pulmones de fumadores. En 1965, el radiobiólogo y médico John B. Little examinó el tejido pulmonar de fumadores en busca de huellas de polonio. No se trataba de una tarea sencilla: la toma de muestras de tejido de fumadores vivos era demasiado invasiva, lo que le obligó a trabajar con cadáveres. «El problema radica en que la mucosa que recubre el pulmón desaparece a las dos o tres horas del fallecimiento», explica Little. Por ello, debía extraerla justo después de la muerte del paciente. Little acabó por demostrar la presencia de polonio en zonas específicas del pulmón: los isótopos se depositan en las bifurcaciones de bronquios, bronquiolos y alvéolos. Allí forman «puntos calientes» radiactivos que emiten partículas alfa.

Durante los diez años siguientes se continuó investigando el polonio en el humo de los cigarrillos. También se estudiaron los mecanismos mediante los cuales el isótopo llega hasta la planta del tabaco, a fin de averiguar en qué fase del proceso de fabricación de cigarrillos podría eliminarse con mayor eficacia. El polonio 210 es un subproducto de la desintegración del plomo 210. En su publicación de 1964, Radford y Hunt especulaban con dos posibilidades: o bien los productos de la desintegración del radón 222 (presente de manera natural en la atmósfera y cuyos residuos incluyen el plomo 210) se depositaban en las hojas de la planta, o bien esta absorbía plomo 210 de la tierra fertilizada. Más tarde se comprobaría que se daban ambos procesos.



Por su parte, el Departamento de Agricultura de EE.UU. consideró la presencia del polonio en los abonos. En un experimento realizado en 1966 junto a la Comisión de Energía Atómica, analizaron dos tipos de fertilizantes: un «superfosfato» comercial y una mezcla especial a partir de fosfato cálcico químicamente puro. Las diferencias fueron notables. El abono comercial contenía unas trece veces más radio 226 que la mezcla, lo que derivaba en una cantidad siete veces mayor de polonio en las hojas. Edward Martell, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica estadounidense, revisó la cuestión en 1974. Sugirió que las tierras tratadas con fertilizantes elaborados a partir de fosfatos ricos en uranio emitirían radón 222 a la atmósfera. El radón se desintegraría en plomo 210 y este se depositaría en los tricomas, los miles de pequeños filamentos que recubren las hojas de la planta del tabaco.

Al igual que el grupo de Harvard, Martell también se interesó por la acumulación de polonio 210 en el pulmón. Durante un tiempo, se aceptó que la exposición a la radiación proveniente de los productos de desintegración del radón constituía la causa principal del elevado riesgo de cáncer que sufrían los trabajadores de las minas de uranio. Eso llevó a Martell a concluir que la exposición crónica de los fumadores a dosis bajas y concentradas de polonio 210 podía suponer la causa principal del cáncer de pulmón y, quizá, también de otros.

KEVIN VAN AELST

Al igual que en el caso de los mineros, el peligro no provenía de una dosis alta administrada de una sola vez, sino de una exposición continuada a pequeñas dosis durante un período largo de tiempo. Un fumador inhala polonio con cada calada. En consecuencia, y por más que las dosis de polonio 210 en cada cigarrillo fuesen relativamente bajas, la elevada exposición asociada a toda una vida de fumador aumentaría el riesgo de contraer cáncer. En 1974, tras introducir polonio en la tráquea de hámsteres, Little y William O'Toole, también de Harvard, confirmaron la siguiente hipótesis: aunque las dosis habían sido tan pequeñas que los tejidos jamás se inflamaron, el 94 por ciento de los hámsteres del grupo sometido a una mayor exposición al polonio desarrollaron tumores pulmonares.

Desde entonces se han descubierto otros componentes del humo del tabaco que también resultan muy carcinógenos. A día de hoy, la mayoría de los expertos probablemente diría que los principales riesgos provienen de sustancias como los hidrocarburos aromáticos policíclicos y las nitrosaminas. No obstante, aun las estimaciones más cautelosas sugieren que el polonio 210 provocaría el dos por ciento de los cánceres de pulmón debidos al tabaco. En un país como EE.UU., ello supone miles de muertes anuales. Algunos expertos añaden que los daños ocasionados por la radiación probablemente incrementen los provocados por otros carcinógenos, y viceversa.

«NINGUNA VENTAJA COMERCIAL»

Al contrario que los científicos externos, los de la industria tabaquera nunca dieron a conocer ni publicaron sus investigaciones sobre el polonio. No obstante, los históricos pleitos que tuvieron lugar en 46 estados norteamericanos durante los años noventa obligaron a los fabricantes a admitir que fumar era peligroso y adictivo. Millones de documentos internos salieron a la luz durante el proceso; miles de ellos demostraron que todas las esferas de la industria, incluidas las más altas, habían discutido con profusión la problemática del polonio.

La publicación de Radford y Hunt apareció unos días después del 11 de enero de 1964, fecha en que el Cirujano General de EE.UU. hizo pública la histórica advertencia sobre los riesgos asociados al tabaquismo. Justo después, algunas notas internas demostraron que los fabricantes eran conscientes de que podían convertirse en objeto de un grave escándalo público si salían a la luz sus conocimientos sobre el polonio. La industria comenzó a invertir gran cantidad de recursos en programas de investigación internos, que se desarrollaron a puerta cerrada.

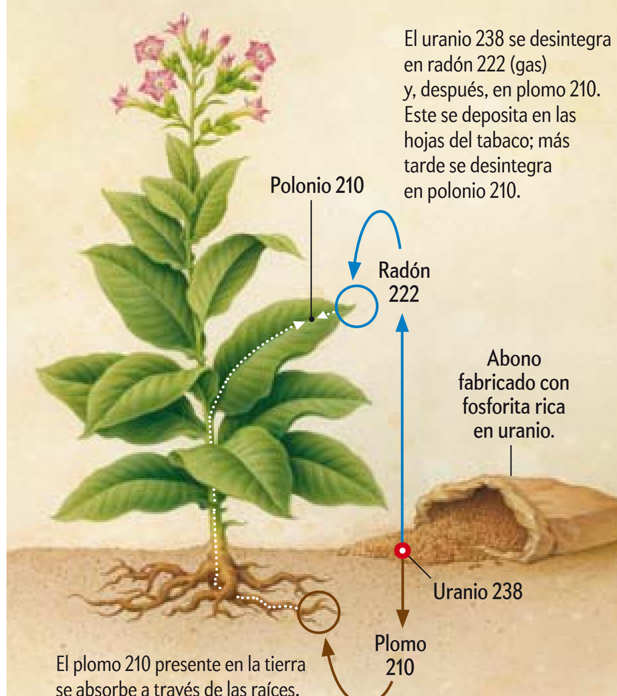
Documentos de Philip Morris datados a finales de los años setenta y principios de los ochenta revelaron que científicos y ejecutivos habían debatido si la compañía debía publicar sus investigaciones. El debate se desarrolló durante una etapa sin publicaciones científicas externas (fuera de la industria, el interés por el polonio en el tabaco ha sido intermitente), por lo que los fabricantes optaron por no perturbar aquel período de paz.

En 1977, los científicos de Philip Morris habían completado el borrador de un artículo titulado «Aparición espontánea de los productos de desintegración del radón 222 en el tabaco y los condensados del humo», que los autores deseaban enviar a *Science*. En una nota dirigida a otro científico de la compañía en 1978, el director de desarrollo de productos de Philip Morris

EL PROBLEMA Y LA SOLUCIÓN

Así llega el polonio al tabaco

El polonio 210 es uno de los productos de desintegración del uranio. Este último se encuentra de forma natural en la tierra, pero su concentración es mucho mayor en las fosforitas empleadas en la fabricación de abonos. Se ha descubierto que el uranio introduce polonio en el tabaco a través del aire y las raíces.



Soluciones

Los estudios realizados por las compañías tabaqueras han demostrado que las siguientes medidas eliminarían el polonio 210 del humo de los cigarrillos:

- Añadir al tabaco sustancias que eviten que el polonio 210 se volatilice y pase al humo
- Emplear abonos con bajo contenido en uranio
- Lavar las hojas tras la recolección
- Emplear filtros de intercambio de iones para bloquear el polonio de los cigarrillos
- Modificar genéticamente la planta del tabaco para obtener hojas carentes de los filamentos donde se deposita el polonio

hizo constar que le preocupaba la publicación del manuscrito. «Tiene la suficiente fuerza como para despertar al gigante dormido», respondió el científico. «Se trata de una cuestión delicada y dudo que debamos aportar datos.» Lo que preocupaba al departamento legal de Philip Morris era que, a pesar de que las cifras diferían, el manuscrito coincidía en lo fundamental con los resultados publicados hasta entonces: el tabaco contiene polonio y este resulta perjudicial. A mediados de julio, y por recomendación del departamento legal de la compañía, se denegó la aprobación para la publicación del manuscrito.

No obstante, los fabricantes exploraron posibles soluciones. La industria debatió las ventajas e inconvenientes de diversos procedimientos para reducir la cantidad de polonio en el humo del cigarrillo; entre ellos, la adición de sustancias al tabaco que impidieran que pasase al humo. También se consideró la fabricación de filtros que bloqueasen el vapor de polonio.

Otra opción, consecuencia de las investigaciones de Martell en los años setenta, consistía en algo tan simple como lavar las hojas de tabaco con una solución diluida de peróxido de hidrógeno. También se barajó el empleo de abonos con cantidades limitadas de los productos de desintegración del uranio 238, así como eliminar de las hojas de tabaco curado los tricomas colectores de plomo. Según admite William A. Farone, antiguo director de investigación aplicada de Philip Morris: «Llegamos a intentar modificar genéticamente la planta del tabaco», con el fin de obtener hojas lisas. Farone se convirtió en un denunciante de las prácticas de la industria tabaquera; en la actualidad trabaja como asesor para la FDA. En 1975, T. C. Tso, investigador del Departamento de Agricultura estadounidense, calculó que entre el 30 y el 50 por ciento del polonio podría eliminarse con facilidad de los abonos y que, además, el lavado eliminaba otro 25 por ciento. Si se añadía un filtro al cigarrillo, el polonio podría eliminarse casi por completo. Pero, tal y como lo expresaba un memorándum de R. J. Reynolds: «Eliminar estas sustancias no reportaría ninguna ventaja comercial».

No obstante, el rechazo de la industria a enfrentarse al problema no hizo más que retrasarlo. Tras la aprobación en junio de 2009 de la Ley para el Control del Tabaco y la Prevención del Tabaquismo en la Familia, la Sociedad Americana del Cáncer invocó esa legislación con el fin de solicitar a la industria que revelara los «venenos de sus productos». Por vez primera, la ley puede obligar a la industria a actuar de acuerdo con los resultados de su investigación.

El polonio sería un primer «veneno» perfecto para ser prohibido en el tabaco. A diferencia de otros compuestos complejos, como el alquitrán o el monóxido de carbono, el polonio es un isótopo sencillo y resulta fácil eliminarlo del humo. Cuatro décadas de investigación llevada a cabo por la industria pueden suministrar a la FDA un punto de partida para conseguir resultados concretos. Además, algunos de los procedimientos para reducir las concentraciones de polonio en el humo, como el lavado de las hojas de la planta, también eliminarían metales tóxicos, como plomo, arsénico o cadmio.

La Organización Mundial de la Salud ha dejado claro que fumar constituye la primera causa de muerte evitable. Calcula que, en todo el mundo, 1,3 millones de personas mueren cada año de cáncer de pulmón, el 90 por ciento de los cuales se deben al tabaco. Si se hubiera reducido el polonio merced a los procedimientos que la industria ya conocía, se habrían evitado miles de esas muertes. Los fabricantes optaron conscientemente por no reaccionar ante los resultados de las investigaciones de sus propios científicos. Pero han sido sus clientes quienes han tenido que vivir con las consecuencias de esa decisión... o morir a causa de ella.

PARA SABER MÁS

Polonium-210: A volatile radioelement in cigarettes. Edward P. Radford Jr. y Vilma R. Hunt en *Science*, vol. 143, págs. 247-249, enero de 1964.

Puffing on polonium. Robert N. Proctor en *The New York Times*; 1 de diciembre, 2006.

The cigarette century: The rise, fall, and deadly persistence of the product that defined America. Allan M. Brandt. Basic Books, 2007.

Waking a sleeping giant: The tobacco industry's response to the polonium-210 issue. Monique E. Muggli et al. en *American Journal of Public Health*, vol. 98, n.º 9, págs. 1643-1650, julio de 2008.

The polonium brief: A hidden history of cancer, radiation, and the tobacco industry. Brianna Rego en *Isis*, vol. 100, n.º 3, págs. 453-484, septiembre de 2009.

CHERIE SINNEN

por Norbert Treitz

Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburg-Essen.



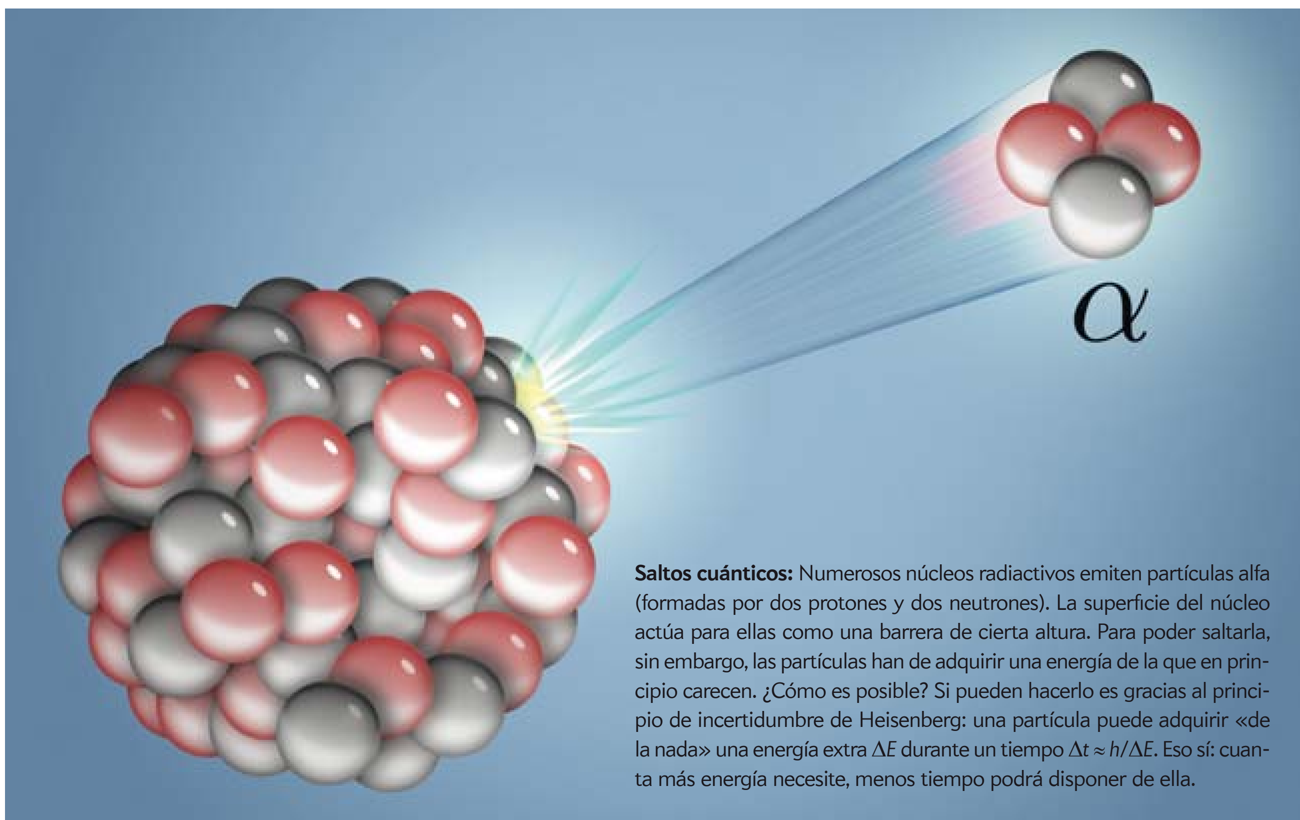
De una nota desafinada al principio de incertidumbre

El principio de incertidumbre no es exclusivo de la mecánica cuántica. Se manifiesta en todos los fenómenos ondulatorios, desde la música hasta la emisión alfa de los núcleos radiactivos

¿Cómo medimos la frecuencia de una vibración? Una manera consiste en contar un numero entero de oscilaciones y medir el tiempo Δt que tardan en sucederse. Si llamamos n al número de vibraciones, la duración de una de ellas (o período) viene dada por $T = \Delta t/n$. Si n es un número entero, la incertidumbre asociada (el error en la medida), Δn, no podrá ser menor que uno. Supongamos a partir de ahora que nuestros cálculos sufren de un error cuyo orden de magnitud es la unidad; es decir, admitimos que el número verdadero de oscilaciones se halla comprendido en el intervalo $n \pm 1$. Al inverso del período se le denomina frecuencia: $f = 1/T$. Tenemos pues una incertidumbre en la frecuencia dada por $f \pm \Delta f = (n \pm 1)/\Delta t$, donde $\Delta f = 1/\Delta t$.

Por tanto, si realizamos una medida durante un segundo, estaremos midiendo la frecuencia con un error de 1 hercio. Tras diez segundos, el error se habrá reducido a 0,1 hercios. Para reconocer una frecuencia con una precisión de k hercios, o para diferenciar entre dos vibraciones cuyas frecuencias se diferencian en k hercios, necesitaremos en general un tiempo de medición de $1/k$ segundos. Cuanto más largo sea el intervalo de medida, menor será el error. De esta manera, medir una frecuencia de manera totalmente exacta nos llevaría una eternidad.

Una vibración típica describe una oscilación sinusoidal. En el caso de fenómenos periódicos más generales, aparte del recuento de las oscilaciones, habría que recurrir al análisis de Fourier (en esencia, una descomposición del movimiento en



Saltos cuánticos: Numerosos núcleos radiactivos emiten partículas alfa (formadas por dos protones y dos neutrones). La superficie del núcleo actúa para ellas como una barrera de cierta altura. Para poder saltarla, sin embargo, las partículas han de adquirir una energía de la que en principio carecen. ¿Cómo es posible? Si pueden hacerlo es gracias al principio de incertidumbre de Heisenberg: una partícula puede adquirir «de la nada» una energía extra ΔE durante un tiempo $\Delta t \approx h/\Delta E$. Eso sí: cuanta más energía necesite, menos tiempo podrá disponer de ella.

sumas de senos y cosenos). A este análisis también se aplica la relación entre tiempo de medida e incertidumbre en la frecuencia. Al respecto, resulta interesante mencionar que dicha relación no depende del valor de la frecuencia.

Una aplicación del análisis de Fourier la proporciona el frecuencímetro de láminas. Este aparato se asemeja a una armónica: consta de numerosas lenguas metálicas de hierro u otro material ferromagnético colocadas unas junto a otras, las cuales poseen frecuencias de resonancia diferentes. El aparato se sitúa dentro de un campo magnético que oscila con la frecuencia que deseamos medir. De esta manera, la lengua con la frecuencia de resonancia «correcta» vibra con mayor intensidad que el resto. Las lenguas vecinas, que tendrán frecuencias ligeramente diferentes, vibrarán menos y sus oscilaciones serán menores cuanto más difieran sus frecuencias de la del campo magnético.

El traspiés del organista

Nuestros oídos también son, en cierta medida, frecuencímetros. Y bastante precisos, por cierto: cuando un músico desafina, lo percibimos con claridad; incluso las menores desviaciones de frecuencia nos chirrían en los oídos. El papel de las lenguas metálicas lo desempeñan, con ciertos refinamientos, las células ciliadas del oído interno. ¿Cuál es la menor variación que podemos percibir?

Según el fisiólogo del siglo XIX Ernst Heinrich Weber, dos estímulos sensoriales R y $R+\Delta R$ se distinguen cuando $\Delta R/R$ sobrepasa cierto valor umbral. Este se sitúa en torno a las tres milésimas para la audición de frecuencias. Es decir, resulta posible diferenciar entre dos frecuencias de 1000 y 1003 hercios (al menos, si disponemos del tiempo suficiente para oírlas); lo mismo se aplicaría a frecuencias de 100 y 100,3 hercios, o de 10.000 y 10.030 hercios. En un intervalo entre dos semitonos consecutivos (cuyas frecuencias relativas satisfacen siempre una proporción algo menor que 1,06:1) cabrían, según esta regla, 20 grados intermedios aún distinguibles.

¿Cuánto tiempo necesita un espectador para darse cuenta de que el músico ha errado en un semitono? ¿Y cuánto tiempo necesita el ejecutante para cambiar a la nota correcta antes de que el público lo perciba?. Tomemos un tono medio: 320 hercios. El semitono siguiente se encuentra un 6 por ciento más alto; es decir, a 338 Hz. La diferencia asciende a 18 Hz, por lo que será audible tras aproximadamente 1/18 segundos.

Sin embargo, si el músico desea bajar tres octavas (esto es, hasta 40 hercios —las frecuencias de dos octavas consecutivas se diferencian en un factor 2—) y se equivoca en un semitono, el error se reduce a 2,4 hercios. Esta variación solo es audible tras $1/2{,}4 \approx 0{,}4$ segundos. Un organista que se equivocara de nota con su pie izquierdo tendría tiempo para corregir su error sin que fuera percibido.

Hasta ahora no hemos hablado de física atómica. Las relaciones matemáticas que hemos introducido son comunes a todo tipo de vibraciones. Extendámoslas ahora a las ondas: si la velocidad de una onda es c, la distancia que avanza en un período define su longitud de onda, λ: $c = \lambda/T = \lambda f$. Para llegar a la celebrada relación de Heisenberg entre la incertidumbre de la energía y la incertidumbre temporal solo nos falta un ingrediente: la hipótesis de Einstein sobre los cuantos de luz.

El fin de la física clásica

Wilhelm Hallwachs ya había descubierto en 1888 el llamado «fotoefecto externo» o «efecto fotoeléctrico externo» a partir de las enseñanzas de su profesor Heinrich Hertz: al iluminar la superficie de un metal, este puede liberar carga eléctrica. En 1895, otro discípulo de Hertz mostró que, para expulsar electrones del metal, no bastaba cualquier luz: la radiación incidente debía poseer una frecuencia mínima. Se trataba de Philipp Lenard, quien más tarde cobraría fama por dos razones bien distintas: por recibir el Nobel en 1905 debido a sus trabajos sobre los rayos catódicos y, décadas después, por su intento de incluir la ideología racista en la física (lo que él denominó «física aria»).

Los electrones pueden hallarse ligados con mayor o menor fuerza a la superficie de un metal. Lo decisivo es la energía necesaria para liberar al electrón. Podemos imaginar esta energía como el dinero de un rescate: toda partícula de luz (fotón) lleva consigo cierta cantidad de energía, la cual es mayor cuanto más alta es la frecuencia del fotón. Sin embargo, el electrón no puede ir «ahorrando» pequeñas cantidades de energía hasta sumar el monto necesario, sino que debe recibir de golpe toda la energía necesaria para quedar libre. Por ello, no le sirve de nada recibir una gran cantidad de luz si ninguno de los fotones posee toda la energía necesaria para «pagar el rescate».

En su hipótesis de 1905, Einstein no solo supuso que la luz venía en porciones individuales de energía («cuantos»), sino que la magnitud de esta era proporcional a la frecuencia: $E = hf$. La constante de proporcionalidad h se denomina «cuanto de acción de Planck». En el año 1900, y para reproducir el entonces inexplicable espectro de radiación del cuerpo negro, Max Planck ya había introducido esa constante «en un acto de desesperación» como magnitud de ayuda (la h proviene de *Hilfe*, «ayuda» en alemán). No existe en física clásica ningún equivalente a la relación $E = hf$.

Hoy en día imaginamos la luz como partícula y como onda al mismo tiempo. Cada partícula de luz transporta consigo una cantidad de energía dada por $E = hf$ y un momento igual a $p = hf/c$. Por otro

lado, se comporta también como una onda de frecuencia f y longitud de onda $\lambda = c/f = h/p$.

El principio de incertidumbre ya no se encuentra lejos. Si insertamos la relación cuántica $E = hf$ en la de incertidumbre clásica $\Delta f = 1/\Delta t$ y multiplicamos a ambos lados por h, obtenemos $\Delta E \cdot \Delta t = h$. Esta es la relación de incertidumbre energía-tiempo de Heisenberg: el producto de la imprecisión en la medida de una energía y lo que dura la medición (o lo que dura el proceso asociado; por ejemplo, lo que tarda un átomo en excitarse por medio de un proceso cuántico) es igual a h. Normalmente, en esta fórmula se sustituye la igualdad por un signo de «mayor o igual que». Ello obedece a que una medida puede ser imprecisa por otras razones, pero nunca más exacta que el límite universal que impone la constante de Planck.

Emisión alfa

Si se espera el tiempo suficiente, numerosos núcleos radiactivos emiten partículas alfa (núcleos de helio, compuestos por dos protones y dos neutrones). Según el tipo de núcleo, el tiempo medio de desintegración va de microsegundos a miles de millones de años. ¿Cómo podemos imaginar el proceso? Los dos protones y los dos neutrones que formarán el futuro núcleo de helio se mueven por el interior del núcleo radiactivo. La superficie del núcleo actúa para ellos como una barrera de cierta altura. Para poder saltarla, deberían adquirir la energía de varios megaelectronvoltios (MeV). (Un MeV es la energía que gana un electrón cuando atraviesa una tensión de un millón de voltios.)

Ya que las partículas alfa no disponen de tal cantidad de energía, quedan retenidas en el núcleo durante largos períodos de tiempo. El físico George Gamow (1904-1968) empleó una imagen muy ilustrativa para describir cómo, a pesar de carecer de la energía necesaria, las partículas pueden escapar del núcleo: en vez de saltando la barrera, lo harían «a través de un túnel». De ahí proviene la denominación «efecto túnel» para los procesos cuánticos en los que una partícula supera una barrera de energía demasiado alta.

No obstante, la analogía del túnel puede inducir a engaño: si hemos de sortear una montaña, su altura determina de manera decisiva el tiempo que tardaremos en atravesarla. En presencia de un túnel, sin embargo, la altura de la montaña se torna irrelevante. Y no es cierto que, en el caso de la desintegración alfa, la «altura» de la barrera energética no afecte al tiempo que tardan las partículas en escapar.

Una analogía debida a Franz Bader se muestra algo más útil: el «crédito Heisenberg». Nuestros fugitivos han de tomar prestada la energía que les falta para sortear la barrera desde el interior del núcleo, y la relación energía-tiempo de Heisenberg establece un listón para el producto de la cantidad de energía prestada y el plazo por el que se les concede el préstamo. Si la barrera es baja, las partículas alfa no necesitan mucha energía extra para abandonar el núcleo. Eso quiere decir que disfrutan del crédito durante largo tiempo y, en sus vagabundeos por el núcleo, cuentan con gran probabilidad de disponer todavía de crédito cuando se topan con la barrera. Núcleos atómicos de este tipo se desintegran rápido. Si, por el contrario, la barrera es elevada, el tiempo durante el que las partículas disponen del crédito necesario para superarla resulta demasiado breve: los núcleos de helio permanecerán, con mayor probabilidad, presos en el núcleo, el cual tardará más tiempo en desintegrarse.

¿Qué mantiene unido al mundo?

Por lo que sabemos, las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza se transmiten por medio de determinadas partículas. Podemos imaginarnos dos partículas que se repelen como dos tenistas sobre patines que juegan en una pista de hielo (o sin apenas rozamiento): al lanzarse la pelota, acabarán alejándose uno de otro. Para la atracción entre dos partículas no existe una analogía tan visual, pero la descripción matemática basada en el intercambio de partículas sigue siendo válida.

Los fotones (las partículas transmisoras de la fuerza electromagnética) y los gravitones (las hipotéticas transmisoras de la gravedad) poseen una masa nula. La interacción débil se transmite por medio de tres bosones llamados W^+, W^- y Z^0. Estos sí poseen masa, la cual viene a ser del orden de la de un átomo pesado: unas 80 o 90 veces la masa del protón. La interacción fuerte, que mantiene unidos los núcleos atómicos, se transmite por medio de gluones. Aunque en realidad los gluones carecen de masa, en nuestro modelo, que tiene por meta explicar la distancia de alcance de la interacciones, asignaremos a los gluones una masa efectiva de unos 10^{-27} kilogramos (aproximadamente igual a la de un protón).

La relación energía-tiempo de Heisenberg nos proporciona una conexión entre el alcance de las interacciones y la masa de las partículas. La ecuación de Einstein $E = mc^2$ nos dice que toda masa equivale a determinada cantidad de energía. Una partícula con energía E puede nacer espontáneamente del vacío gracias al «crédito Heisenberg», pero solo por un corto período de tiempo: el que impone la relación $\Delta t = h/\Delta E$. El camino que puede recorrer una partícula en ese tiempo determina el alcance de la interacción (en orden de magnitud, dicha velocidad puede considerarse próxima a la de la luz). Para partículas sin masa, ΔE puede ser tan pequeña como queramos, por lo que el «crédito Heisenberg» se extiende por un tiempo indefinido. Como consecuencia, las fuerzas gravitatoria y electromagnética tienen un alcance infinito.

Para las otras partículas (los bosones W^+, W^- y Z^0, y los «gluones masivos» del modelo que estamos considerando aquí), ΔE debe igualar, al menos, a la energía que se corresponde con su masa según la fórmula de Einstein. La interacción fuerte, por ejemplo, alcanza a las distancias que separan a los nucleones: lo suficiente para mantener unidos los núcleos atómicos.

Interacción	Partícula	Masa	Energía asociada	Alcance
Gravitatoria	Gravitón	0	0	Infinito
Electromagnética	Fotón	0	0	Infinito
Fuerte	Gluon	$1{,}5 \times 10^{-27}$ kg (masa efectiva)	1 GeV	1 fm = 10^{-15} m
Débil	W^+, W^-, Z^0	$1{,}5 \times 10^{-25}$ kg	100 GeV	0,01 fm = 10^{-17} m

Cuanto mayor es la masa de la partícula que transmite una fuerza fundamental, tanto menor es su alcance.

por Gabriel Uzquiano



Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

Los límites del conocimiento

El error del verificacionista: ¿qué nos dice la paradoja de Fitch?

En matemáticas, hay argumentos que parecen demostrar la existencia de objetos que poseen ciertas propiedades, pero sin llegar a construir un ejemplo concreto. Consideremos la siguiente demostración de que existen números irracionales a y b tales que a^b es racional:

> O bien $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional o bien no lo es. Si lo es, basta con tomar los valores $a = b = \sqrt{2}$. Si no, tomaremos $a = \sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ y $b = \sqrt{2}$, ya que $(\sqrt{2}^{\sqrt{2}})^{\sqrt{2}}$ no es otro que 2, que es racional.

El argumento es una demostración no constructiva de la existencia de números irracionales a y b tales que a^b es racional, ya que no nos permite saber cuáles son esos números.

El *intuicionismo* es una corriente matemática que rechaza tales demostraciones. De manera más general, el intuicionismo no admite ciertas aplicaciones del principio del tercio excluso:

$$p \text{ o no } p,$$

donde p simboliza cualquier proposición. Este principio de la lógica clásica podría parecer incontrovertible: o bien hay otros planetas habitables además de la Tierra, o bien no los hay. ¿Cuál podría ser la alternativa, si no? ¿Cómo negar que o bien $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional o bien no lo es?

Una manera de motivar el punto de vista intuicionista proviene de identificar *la verdad* de una proposición con *la existencia de una demostración* de dicha proposición. Es posible verificar que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional si existe una demostración de que lo es. En el caso de la negación, es posible verificar que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ no es racional si existe una demostración de que no es posible demostrar que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional: una demostración, por ejemplo, de que una prueba de que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional nos llevaría a una contradicción. Por tanto, para un intuicionista, decir que «o bien $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional o bien no lo es» equivale a decir que «o bien existe una demostración de que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional, o bien existe una demostración de que no es posible demostrar que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional». Lo que no resulta obvio en absoluto es que haya de existir una u otra: tal vez no exista ninguna demostración de que $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional, ni tampoco ninguna de que sea imposible demostrarlo.

No es que el intuicionista rechace todas las instancias del principio del tercio excluso. El caso de la proposición «$\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ es racional o no lo es» resulta completamente distinto del caso que nos plantearía un proposición más elemental, como «783.647 es un número primo o no lo es». El intuicionista no pone reparo alguno en aceptar la proposición de que o bien 783.647 es un número primo, o bien no. La diferencia radica en que, en este caso, disponemos de un algoritmo que nos permite verificar, e incluso demostrar, que 783.647 es un número primo (o, por el contrario, que no lo es).

Verificacionismo

Algunos intuicionistas derivan su posición con respecto a la matemática a partir de una doctrina mucho más general. Esta insiste en identificar *la verdad* de una proposición (matemática o no) con *la posibilidad de verificarla*. El programa verificacionista se caracteriza por el siguiente esquema:

> Si es cierto que p, entonces p es verificable,

donde p representa una proposición cualquiera. ¿Qué quiere decir que una proposición p es verificable? No siempre existe un acuerdo al respecto. Pero, como mínimo, afirmar que p es verificable debe querer decir que, en principio, es posible saber que p. Esta última condición es sumamente débil. En principio, puede que resulte posible saber cuántos afinadores de piano existen hoy en el mundo, pero no parece que nadie vaya a contarlos. Aunque la cuestión de qué significa «es posible saber que p» se muestra mucho más delicada, por el momento codificaremos la posición verificacionista mediante el siguiente esquema:

(V) Si es cierto que p, entonces $\Diamond Sp$,

donde p simboliza cualquier proposición, S es una abreviación de «se sabe que» y $\Diamond$ se lee como «es posible que». «Se sabe que» codifica el conocimiento humano: decir que «se sabe que p» equivale a afirmar que, en algún momento (aunque quizá no ahora mismo), sabemos que p.

La tesis verificacionista parece implicar cierto optimismo acerca de nuestra capacidad para adquirir conocimiento. Si no sabemos si hay otros planetas habitados, no es porque no sea posible saberlo, sino porque no hemos invertido todavía los medios o el esfuerzo necesario. Además, según el verificacionista, este caso no constituye una excepción, sino más bien la regla.

El problema radica en que, en combinación con ciertos supuestos elementales, la tesis verficacionista implica nuestra omnisciencia, algo del todo irrazonable:

> Si es cierto que p, entonces se sabe que p.

Resulta difícil exagerar lo implausible de esta tesis. Si hoy día existen diez mil afinadores de piano en el mundo, resulta que ya se sabe que hay diez mil. Pero ¿quién lo sabe, si nadie se ha dedicado a contarlos? Si hay otros planetas habitables, resulta que se sabe. Y, si no los hay, resulta que también lo sabemos.

La paradoja de Fitch

Podemos representar la tesis relativa a nuestra omnisciencia del siguiente modo:

(O) Si es cierto que p, entonces Sp.

El argumento de que **V** implica **O** se conoce como *paradoja de Fitch*, ya que apareció en un artículo publicado por Frederic Fitch en 1963. Sin embargo, Fitch atribu-

ye la demostración a un evaluador anónimo de un artículo suyo que nunca llegó a aparecer. (Hoy sabemos que el misterioso evaluador era el lógico Alonzo Church.)

La estructura de la demostración es la siguiente: bajo el supuesto de que **O** no es cierto, se utiliza **V** para llegar a una contradicción; por último se concluye que, si es cierto que **V**, entonces **O** también debe serlo. La demostración que reconstruimos aquí utiliza los símbolos lógicos $\wedge$ («y») y $\neg$ («no es el caso que»).

Supongamos que **O** es falso:

(1) $p \wedge \neg Sp$

(«es cierto que p y no sabemos que p»). Ahora aplicamos **V** al supuesto:

(2) $\Diamond S[p \wedge \neg Sp]$

(«es posible saber que p es cierto sin saber que p»). Saber que «q y r» implica saber que q y saber que r:

(3) $\Diamond[Sp \wedge S\neg Sp]$

(«es posible saber que p y saber que no se sabe que p»). Pero «saber que q» implica q, por lo que:

(4) $\Diamond[Sp \wedge \neg Sp]$

(«es posible saber que p y no saber que p»).

La última línea admite la posibilidad de una contradicción: que es posible saber que p y, al mismo tiempo, no saberlo. Como el supuesto del que partimos (es cierto que p y no se sabe que p) implica la posibilidad de una contradicción, se sigue que es falso: si es cierto que p, entonces se sabe que p. ¡Pero no hemos asumido nada concreto sobre p! La proposición p podría ser la de que en el mundo hay diez mil afinadores de piano, la de que hay otros planetas habitables, o cualquier otra.

Merece la pena detenernos en cada paso de la argumentación. La primera línea es el supuesto de que **O** no es cierto con respecto a p: es cierto que p, pero aun así no sabemos que p.

El segundo paso no es más que la aplicación de la tesis verificacionista al supuesto del que partimos: si lo que dice la primera línea es cierto, entonces el verificacionista parece comprometido con la tesis de que es posible saberlo.

La tercera línea se justifica a partir de la siguiente observación. Si se sabe una proposición de la forma «q y r», entonces se saben cada una de las dos proposiciones, q y r. Si sabemos que «Oxford está en el sur de Inglaterra y Londres está en el sur de Inglaterra», entonces sabemos que Oxford está en el sur de Inglaterra, y también que Londres está en el sur de Inglaterra. Por tanto, si es posible «saber que q y r», entonces es posible «saber que q y saber que r».

La justificación del cuarto paso se basa en que, si sabemos que p, entonces ha de ser cierto que p. No podemos saber que Oxford está en el sur de Inglaterra a menos que sea cierto que lo está. En particular, para saber que no se sabe que q, ha de ser cierto que no se sabe que q. Y en el contexto de «es posible que», se sigue que solo es posible saber que no se sabe que p si, en efecto, no se sabe que p.

Saber o no saber

¿Cómo responder al argumento de que el principio de verificabilidad implica que sabemos todo aquello que es cierto? Si adoptamos la perspectiva de la lógica clásica, entonces parece que debemos admitir que el razonamiento es impecable. Hay proposiciones cuya verdad es inaccesible para nosotros: no es posible, ni siquiera en principio, llegar a saber que son verdaderas. El argumento nos recuerda que debemos ser humildes y reconocer que hay límites sobre lo que podemos llegar a saber.

Pero el verificacionista no puede admitir que hay verdades transcendentes e inaccesibles para nosotros. Una solución consiste en delimitar el alcance del esquema verificacionista. Al fin y al cabo, el verificacionista motiva su postura a partir de proposiciones como la de que «hay otros planetas habitables», y no por medio de proposiciones que involucran estados mentales, como «hay otros planetas habitables, pero no se sabe que los hay». Existen varias maneras de restringir el alcance del esquema verificacionista. Se puede, por ejemplo, restringir **V** a proposiciones «cartesianas», donde p es una proposición cartesiana si y solo si es lógicamente consistente que p sea cierto sin que lo sepamos. Sin embargo, estrategias como esa desprenden cierto aire de desesperación, ya que parecen especialmente diseñadas para bloquear la derivación anterior.

El intuicionista posee más margen de maniobra. Su conclusión es la siguiente:

$$\neg[p \wedge \neg Sp],$$

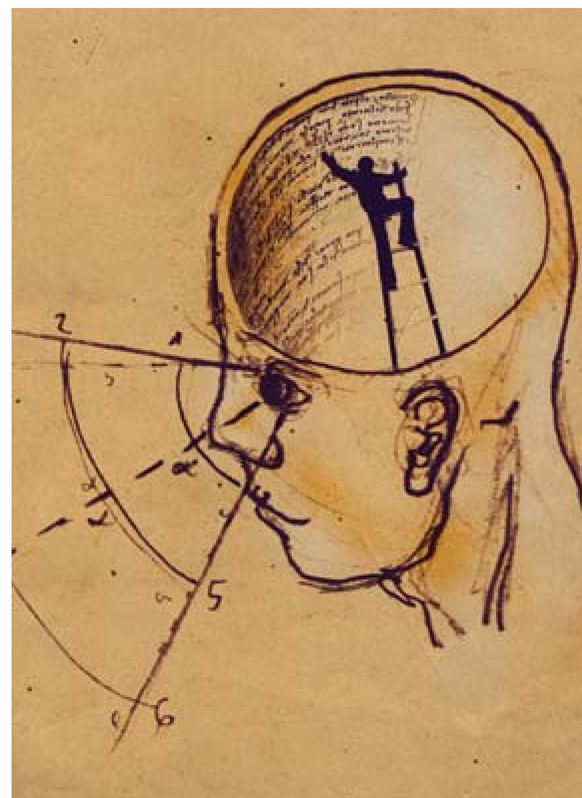
que no es más que la negación del supuesto del que partimos en la demostración anterior. Pero, para un intuicionista, lo anterior equivale a:

$$p \rightarrow \neg\neg Sp.$$

Es decir, si es cierto que p, entonces no es cierto que no se sabe que p.

Ahora bien, para el intuicionista, $\neg\neg q$ no equivale a q. En el caso matemático hemos leído $\neg q$ como «existe una demostración de que no es posible demostrar que q».

¿Cómo extender la interpretación intuicionista al caso más general? Si leemos $\neg q$ como «es imposible verificar que q», debemos leer $\neg\neg q$ como «es imposible verificar que es imposible verificar que q». Llegamos así a la conclusión de que, si es cierto que p, entonces es imposible verificar que es imposible verificar que p. ¿Qué podría ser más inocente que la afirmación de que, si existen diez mil afinadores de pianos, entonces es imposible verificar que es imposible verificar que existen diez mil afinadores de pianos? Parece que el intuicionista puede consolarse con la observación de que la verdad de semejante afirmación no tiene por que requerir que verifiquemos que en el mundo existen diez mil afinadores de piano.

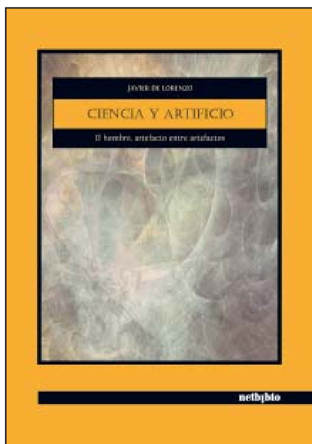


DANIEL UZQUIANO

PARA SABER MÁS

New Essays on the Knowability Paradox. Joe Salermo. Oxford University Press, 2009. La obra recoge el tratamiento más completo de la historia de la paradoja de Fitch, así como del conjunto de respuestas posibles.

Aunque la dificultad que plantea la paradoja de Fitch se parece al problema que tratamos en la columna de mayo de 2010 («Una lección de humildad»), de manera bastante curiosa, las razones son muy diferentes.



CIENCIA Y ARTIFICIO:
EL HOMBRE, ARTEFACTO ENTRE ARTEFACTOS,

por Javier de Lorenzo. Netbiblo, S.L.; La Coruña, 2009.

Filosofía

Sobre lo natural y lo artificial

Javier de Lorenzo, con su peculiar estilo vanguardista y provocador, nos ofrece un excelente estudio sobre esta reflexión filosófica —que viene de siglos atrás— pero que ha sido reinventada en pleno siglo XX: la filosofía de la ciencia. Dice: ...*a mediados del siglo XX, se ha llegado a constituir lo que se pretende en este nuevo campo o disciplina: la* Filosofía de la Ciencia *y no ya de la naturaleza, con las mismas secuelas asociadas. Un saber pretendidamente teórico que viene condicionado, en su constitución, por la previa existencia de unos hechos.* Unos hechos que desglosa en la praxis científica, los discursos acerca de esta praxis y discursos o historias acerca de los discursos.

La conveniencia de repensar esas cuestiones la clarifica en los siguientes párrafos: ...*Hay que ser conscientes de un cambio radical producido en la praxis científica desde los entornos de 1939: la íntima unión de ciencia y técnica ha provocado la aparición de la tecnología y, en ella, de la gran ciencia, con su valoración asociada. Y la gran ciencia ha llevado a la transformación radical del hábitat humano con la constitución de un nuevo ámbito, el tecnológico, en el que nos encontramos* [...]. *De aquí que en la propia Filosofía de la Ciencia se tenga que prestar atención a los momentos en los cuales se está realizando la práctica científica que se analiza, sin trasvases confundentes.* Así nos advierte de lo que, de alguna manera, constituye uno de los núcleos de su análisis: somos artesanos, artistas y vivimos en una «realidad» —¿podríamos calificarla de «realidad natural humana»?— en la cual «nuestra realidad» está colmada de artefactos, artilugios, ingenios, herramientas, máquinas, utensilios, etcétera, fruto de nuestra propia creación —pero nosotros somos también naturaleza, realidad— y ya nada se puede entender, y mucho menos en ciencia, sin tener presente esta realidad, por ahora absolutamente irrenunciable e imprescindible.

Javier de Lorenzo es contundente: ...*y lo humano se centra en lo artificial* [...] *y la asunción de que lo artificial es lo natural.* [...] *Ambiente artificial que se convierte, al que nace, crece, se educa y vive en él, en* su *ambiente y ya considera que lo natural es ese entorno que realmente es artificial* [...]. *Y quizás algo más fundamental, y es la creación de un futuro, de un tiempo que va más allá de lo presente, de lo local* [...]. *El hombre pasa a vivir en función de un futuro, no ya de un presente.* Pero va más allá —mucho más allá, diría— cuando en este «natural-artificio» coloca también los artificios de la mente (las ideas, los conceptos, las creaciones del cerebro, del arte de pensar, etcétera) y no solo los artilugios de índole mecánica, más materiales, que evidentemente no excluye. Todo ello conforma el «hábitat» donde se desarrolla la ciencia y, por consiguiente, debe ser tenido en cuenta en cualquier análisis de aproximación a su estudio, en cualquier filosofía de la ciencia.

Leemos: ...*Situados aquí y ahora, y en un cuadro como el anterior, parto de la convicción, por experiencia vivida, de que la concepción del cosmos y las preocupaciones vitales inmediatas de una india maya en Sierra Lacandona, México, no es la misma que la que tiene cualquiera de los que lean este libro, aquí, en España. Ni es la misma —ahora por trasvase cultural— que pudieran tener los creadores de la Ciencia en los entornos del siglo XVI, ni los posteriores: Napoleón recorrió Europa prácticamente igual que César, sin luz eléctrica, sin tren, sin radio... Concepción del cosmos, preocupaciones vitales que vienen radicalmente condicionadas por el tipo de sociedad en la que ha nacido y desarrollado cada uno. Y el tipo de sociedad en la que nos encontramos —el lector, el autor— viene condicionado, a su vez, por la elección que esta sociedad realizó cuando aceptó una determinada metáfora-raíz.*

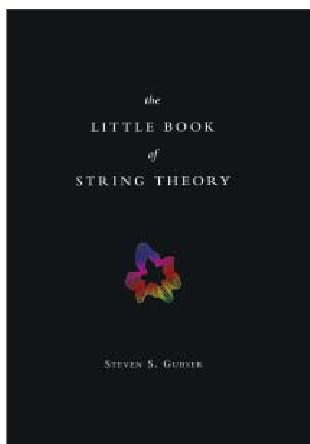
Aparece así uno de los ejes de su estudio, la metáfora-raíz, un concepto le lleva a sintetizar la racionalidad científica en los siguientes puntos: el conocimiento científico no viene dado, revelado, en jardín amurallado alguno, sino que es algo que hay que construir; el conocimiento de la *physis* viene mediado, siempre, por previos marcos o concepciones globales, por metáforas-raíz; no hay un conocimiento ni un saber absolutos; el mundo no está cerrado ni ontológica ni epistemológicamente.

Tras la introducción, en donde se fijan los ejes de coordenadas, siguen seis capítulos de lectura obligada y atenta, que analizan el influjo en la ciencia de este «natural-artificial». Se agrupan en dos partes. La primera, sobre «El mecanicismo y el hacer científico», expone con detalle el análisis conceptual-evolutivo del mecanicismo. Pone de relieve esa dependencia contextual de los avances conceptuales y tecnológicos en el marco del mecanicismo, y el papel del lenguaje, de los lenguajes-artificio-naturales.

La segunda parte se centra en la «Modelización y experimentación». ¿Cómo debemos-podemos realizar los modelos? ¿Con qué lenguajes? Que, evidentemente, son teleológicos. Tienen finalidad: llegar al experimento que, en un acto simbiótico, fuerza el modelo mientras éste a su vez impone las condiciones del experimento. En síntesis: ...*De aquí que el modelo, como producto artificial, como artefacto, no pueda ser juzgado como verdadero o falso sino que, para valorarlo, se tenga que atender a criterios de relevancia. He insistido en la existencia de objetivos, de intencionalidad en la construcción de los modelos, en su dimensión pragmática* [...]. *La experimentación se hace clave de la praxis científica y tiene en el laboratorio su terreno propio siempre ligado a la construcción del modelo propiciado por el marco conceptual y matemático en el que se incardina dicha praxis.*

En definitiva, una obra de madurez, de años de estudio y de reflexión, de un filósofo/matemático, matemático/filósofo, con un claro interés —y conocimientos— en *Philosophia Naturalis.* En definitiva, obra de síntesis, atajo para todos nosotros, pero atajo inteligente.

—*Josep Pla i Carrera*



THE LITTLE BOOK OF STRING THEORY,
por Steven S. Gubser. Princeton University Press; Princeton, Nueva Jersey, 2010.

De branas y cuerdas

Breve introducción a la teoría del todo

La teoría de cuerdas es la propuesta en física teórica más avanzada para describir de forma unificada todas las interacciones de la naturaleza. A menudo y tal vez de forma desafortunada se la denomina «teoría del todo». Dejando de lado este grandilocuente apelativo, la elegancia matemática de esta teoría es incuestionable y los principios que la sustentan realmente profundos.

La idea fundamental de la teoría de cuerdas establece que todas las partículas que hallamos en la naturaleza corresponden a estados de vibración de una cuerda elemental de longitud extremadamente pequeña (longitud de Planck, unos 10^{-35} metros). La especie humana no dispone de la tecnología suficiente para analizar distancias tan pequeñas, por lo que solo tiene acceso experimental a las propiedades de las cuerdas de bajas energías. No podemos observar la forma detallada en que las cuerdas se comportan en su escala natural. Este argumento conlleva la gran controversia que rodea a la teoría de cuerdas: no existe ninguna prueba experimental de su validez. Lo que es peor, es poco probable que hallemos alguna manera de validar esta teoría a corto o medio plazo. La fuerza de la teoría de cuerdas se fundamenta en su consistencia y completitud. Su debilidad reside en que es imposible calcular de forma fidedigna la forma en que esta teoría se expresa a bajas energías. Una teoría que no produce predicciones y que no se puede falsar (en el sentido de Karl Popper) es, para algunos, más dogma que ciencia.

El debate sobre la idoneidad o futilidad de la teoría de cuerdas se ha enconado a lo largo de los años. Grandes divulgadores como Brian Greene (*The Elegant Universe*) han defendido de forma convincente los elementos relevantes de la teoría. Desde el otro bando, científicos como Lee Smolin (*The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, the Fall os a Science, and What Comes Next*) han denostado la supuesta altivez e irrelevancia de una teoría indemostrable.

Existe también un problema subyacente de visibilidad mediática. Muchos de los científicos que han desarrollado la teoría de cuerdas se hallan entre los más prestigiosos del planeta. Sin embargo, otros que trabajan en campos con menor impacto en los medios de comunicación producen resultados notables y ciertos. En la opinión de este segundo grupo de expertos, cercanos a los experimentos, la investigación en teoría de cuerdas es un lujo injustificable al que hay que poner coto.

Lejos de estas apasionadas discusiones, el nuevo libro de Steven S. Gubser (*The Little Book of String Theory*) es una joven y sana propuesta de presentación de la teoría de cuerdas. Siguiendo la estela de grandes divulgadores sajones, Gubser se adentra en el difícil territorio de explicar la física sin fórmulas. Para ser precisos, el autor sí utiliza un número reducido de ecuaciones explícitas, pero siempre de forma cauta y bien elaborada. La dificultad del texto, sin embargo, reside en la complejidad intrínseca de la teoría de cuerdas. No es fácil transmitir las ideas de simetría, teorías de aforo (*gauge*), cuerdas, D-branas o dualidad. Cada capítulo constituye todo un reto tanto para el autor como para el lector.

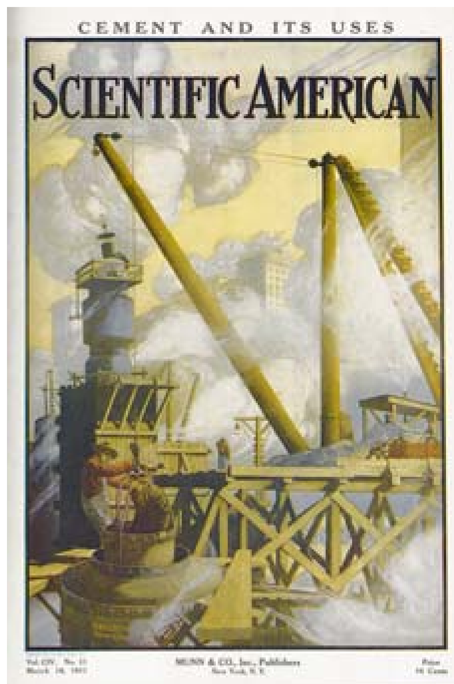
La estructura de este conciso libro es clara. El autor introduce los elementos básicos de la teoría de cuerdas y, progresivamente, presenta los desarrollos más recientes y próximos a su investigación. Una buena parte del texto habla de D-branas, objetos extensos que aparecen de forma natural en la teoría de cuerdas y que fueron ignorados hasta la década de los noventa. El aspecto más delicado de la obra es la forma en que las dualidades de la teoría de cuerdas son presentadas. Las analogías que utiliza Gubser para apoyar sus explicaciones son útiles, aunque a veces dejan un regusto inquietante. En concreto, la imagen de que una dualidad de la teoría de cuerdas se puede entender como un baile entre Fred Astaire y un alienígena no deja de tener un punto de surrealismo.

Un hecho curioso es que Gubser ha optado por omitir ciertos desarrollos y nomenclaturas. Por ejemplo, el texto no discute el hecho de que las cinco versiones consistentes de teorías de cuerdas corresponden a una única teoría. Tampoco introduce como tal el concepto de holografía y la correspondencia AdS/CFT. El autor elabora repetidamente ideas sobre agujeros negros en sus versiones extendidas pero hace una mención mínima del problema del paisaje (*landscape*). El libro de Gubser es, pues, una apuesta bien definida que enfatiza ciertos temas y minimiza la jerga que acompaña a la teoría de cuerdas.

Es muy posible que este libro despierte interés en futuros investigadores noveles, como también es probable que deje insatisfechos a lectores con formación sólida. Siempre es difícil hallar el punto medio. La teoría de cuerdas merece ser explicada, en tanto que es una construcción matemática magnífica y la única propuesta consistente de comprensión unificada de las leyes de la naturaleza. Siguen siendo necesarios más libros, diversos, con enfoques diferentes y criterios críticos y vocacionales sobre la teoría de cuerdas. Sea bienvenido el esfuerzo de Gubser.

—José Ignacio Latorre

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



El hormigón armado dibuja la nueva silueta de las ciudades estadounidenses, 1911.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIV, Nº. 11; 18 DE MARZO DE 1911

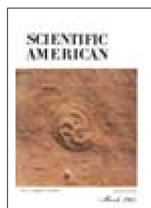
Marzo 1911

Construir con hormigón

«Hace unos quince años se realizaron auténticos esfuerzos para combinar el acero y el hormigón. Se pretendía conformar el primero dentro del segundo de tal manera que el producto resultante poseyera una alta resistencia no solo a los esfuerzos de compresión, sino también a los de flexión y tracción. Se llevaron a cabo numerosos experimentos que dieron como resultado nuestro hormigón armado moderno. El hormigón ha resultado apto para casi cualquier tipo de construcción (*ilustración*) que hasta la fecha se había realizado en ladrillo o piedra, y además ha invadido el campo que se suponía privativo del hierro y del acero.»

La atmósfera de Venus

«Venus es casi tan grande como la Tierra y, al hallarse más cerca del Sol, debe presentar una temperatura superior a la de nuestro planeta. Su temperatura media se estima en unos 60 grados Celsius. Diversos fenómenos parecen indicar que aquel planeta está envuelto en una atmósfera relativamente densa y nublada que, ciertamente, se ofrece a nuestra vista como un borde luminoso durante los tránsitos de Venus por encima del disco solar, algo que sucede una o dos veces cada siglo. Tan densa atmósfera refleja en gran medida los rayos solares. Se evita así el calentamiento excesivo de la superficie del planeta, sobre la que resultaría imposible una vida altamente organizada. Debería considerarse un planeta habitable.»



Marzo 1961

Oxígeno para el escepticismo climático

«El gélido invierno que ahora acaba podría no ser, por desgracia, una mera casualidad. La tendencia al calentamiento que ha sufrido el clima mundial desde 1880 parece haber llegado a su fin. Murray Mitchell, Jr., de la Agencia de Meteorología de EE.UU. informó que la temperatura media anual ha descendido en ambos hemisferios unos 0,1 grados Celsius desde inicios de los años cuarenta. En numerosas zonas ya se han recuperado las condiciones climáticas que existían en los años veinte. Ese enfriamiento ha aplacado los temores acerca del "efecto invernadero": se suponía que las concentraciones crecientes de dióxido de carbono en la atmósfera, consecuencia del aumento del consumo de combustibles fósiles, atraparían cada vez más energía solar. Sin embargo, se desconocen las causas del descenso actual de temperatura.»

Las temperaturas diurnas disminuyeron durante los años cuarenta y cincuenta debido a la reflexión de la luz solar en las nubes de aerosol creadas por la contaminación industrial.

Gravedad

«Si en un futuro experimento se demostrase que las antipartículas poseen realmente una masa gravitatoria negativa, se asestaría un golpe mortal a la totalidad de la teoría gravitatoria relativista porque se refutaría el principio de la equivalencia.

Una antimanzana podría caer hacia arriba en un campo gravitatorio auténtico, pero apenas podría hacerlo en una nave espacial acelerada de Albert Einstein. Si así fuera, un observador exterior la vería moverse con una aceleración doble a la de la nave, sin que sobre ella actuase fuerza alguna. El descubrimiento de la antigravedad nos obliga, por tanto, a elegir entre la ley de la inercia de Newton y el principio de la equivalencia de Einstein. Este autor desea de todo corazón que tal cosa no llegue a ocurrir.

—George Gamov»



Marzo 1861

La pesada esclavitud de la aguja

«En la actualidad hay en el Reino Unido 650.000 mujeres empleadas como sombrereras, modistas, costureras y camiseras. Dada la naturaleza manual de su trabajo, constituyen, por término medio, la más esclava, subordinada y desdichada de las clases trabajadoras. Se necesitan medio millón de máquinas de coser, cuya introducción supondría doblar los salarios. Los hombres deben finalmente traspasar la monótona pesadez de coser a mano a unas máquinas manejadas o atendidas por mujeres. Dos tercios de los oficiales y aprendices de sastrería de Gran Bretaña —50.000 varones sanos— podrían perfectamente emplearse en el servicio de la armada o en unos trabajos más adecuados que manejar una aguja.»

Risas y chispas

«En algunos de los hogares de esta ciudad caldeados con horno, el aire se deseca tanto que una diversión corriente entre los chiquillos consiste en encender el gas con la chispa de la electricidad de sus dedos. Frotando los pies sobre la alfombra el cuerpo se carga de tanto fluido eléctrico que, al acercar el dedo al mechero, salta una chispa que basta para prender el gas.»

ASTROFÍSICA

Viaje a los confines de la materia

Martin Gorbahn y Georg Raffelt

El avance del Gran Colisionador de Hadrones en regiones energéticas completamente nuevas promete ser el principio de una nueva era en la física de partículas.



PSICOLOGÍA COGNITIVA

El lenguaje moldea el pensamiento

Lera Boroditsky

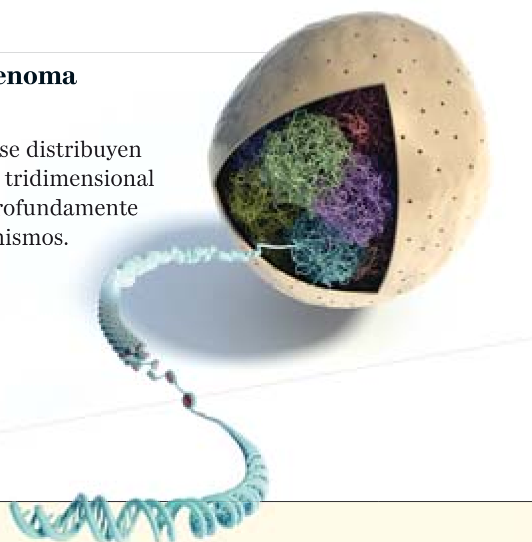
Nuestra percepción del mundo está influida por la lengua que hablamos.

BIOLOGÍA

La vida interior del genoma

Tom Misteli

La forma en que los genes se distribuyen y se mueven por el espacio tridimensional del núcleo celular afecta profundamente al funcionamiento de los mismos.



SALUD

Combatir la obesidad

David H. Freedman

La ciencia ha ahondado en los procesos metabólicos que influyen en nuestro peso, pero la clave del éxito puede residir en otro lugar.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Origen de la copulación, Vida en los abismos, De cerca*; Juan Manuel González Mañas: *Fábricas de gripe, Cien billones de conexiones*; Emilio Elizalde: *Formación de galaxias y materia oscura*; Luis Bou: *Víctimas del cambio climático*; M.ª José Báguena: *Humo radiactivo*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; Bruno Moreno: *Chasquidos de la lengua, Apuntes*; M.ª Rosa Zapatero: *Apuntes*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España